

# Modellierung der Energienachfrage unter Berücksichtigung urbaner Formen und individueller Zeitverwendung

Der Fakultät für Angewandte Informatik  
der Universität Augsburg  
zur Erlangung des Doktorgrades  
vorgelegte

D i s s e r t a t i o n

von

**Stephan Braun**

Juli 2012



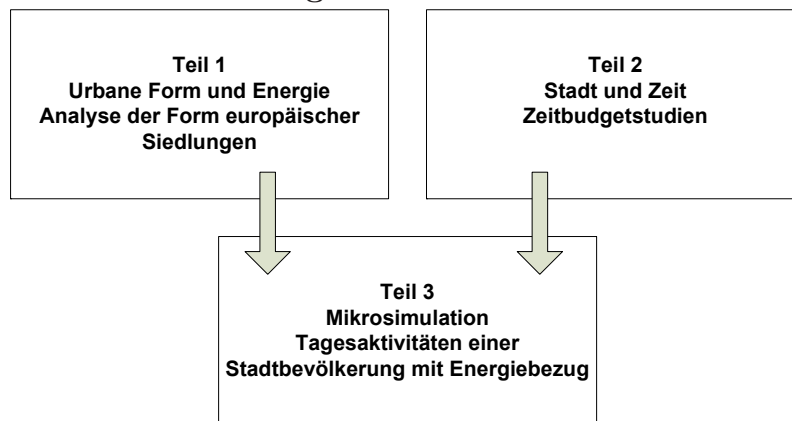
Institut für Geographie  
Lehrstuhl für Humangeographie und Geoinformatik, Universität Augsburg  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching

Erster Gutachter :	Prof. Dr. Gerd Peyke Lehrstuhl für Humangeographie und Geoinformatik Universität Augsburg
Zweiter Gutachter :	Prof. Dr. Thomas Hamacher Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik Technische Universität München
Tag der mündlichen Prüfung:	20.12.2012

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit analysiert mit urbanen Formen sowie der Zeitverwendung von Individuen zwei wesentliche Einflussfaktoren auf die Energienachfrage. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in ein Simulationswerkzeug integriert, das innerstädtische Energieflüsse im Haushaltssektor abbildet (vgl. Abbildung 0.1).

**Abbildung 0.1:** Aufbau der Arbeit



Der erste Teil dieser Arbeit betrachtet die urbane Form als Einflussgröße im Energiesystem. In diesem Abschnitt werden die Ursachen von Formveränderungen von Siedlungen beschrieben. Es wird herausgestellt, wie die Stadtstruktur auf die verschiedenen Formen von nachgefragter Energie einwirkt. So wird auf den Wärmebedarf, die Elektrizitätsnachfrage als auch auf die Nachfrage nach Treibstoff im Verkehrssektor eingegangen. Diese ganzheitliche Betrachtung ist bedeutsam, da die vorhandene Literatur zumeist nur spezielle Aspekte oder Einzelfallstudien aus dem urbanen Wirkungsgeflecht herausgreift. Dieser eher theoretisch angelegte Abschnitt liefert grundlegende Informationen für die Gestaltung des im letzten Teil dieser Arbeit erstellten Simulationsmodells und legitimiert die in Kapitel 3 durchgeführte Analyse europäischer Siedlungen. Dafür wurde in MATLAB ein Werkzeug entwickelt, das Siedlungsformen aus frei verfügbaren europaweiten Rasterdaten verarbeitet. Mit Hilfe des programmierten Werkzeugs wurden Daten von mehr als 130000 europäischen Siedlungen erfasst und ausgewertet. Für über 30 europäische Länder wurden die Siedlungsverteilung, die mittlere Siedlungsgröße sowie die Zersiedlungen unter Verwendung verschiedener Indikatoren bestimmt. Durch statistische Analysen konnte gezeigt werden, dass sich die Siedlungsstrukturen der betrachteten europäischen Länder signifikant unterscheiden.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Thematik Zeit. Hierbei wird auf die Bedeutung von Zeit für die Stadt als auch auf die Nutzung von Zeit durch Individuen eingegangen. Die zeitliche Abhängigkeit von Energienachfrage und -angebot unterstreichen die Bedeutung dieser Thematik. Den Schwerpunkt dieses Abschnitts bilden Zeitbudgetdaten, deren Nutzen für energierelevante Fragestellungen aufgezeigt wird. In diesem Zusammenhang wird die nationale Zeitbudgeterhebung aus dem Jahr 2000/2001 im Hinblick auf die in dieser Arbeit erstellten Simulation beschrieben und ausgewertet.

Der letzte Teil dieser Arbeit greift die Themen der vorangegangenen Kapitel auf, um Erkenntnisse dieser Analysen für eine Simulation im urbanen Kontext nutzbar zu machen. Mit Hilfe einer umgesetzten Mikrosimulation wurde ein Werkzeug geschaffen, das es ermöglicht Energieflüsse im Haushaltssektor einer Stadt zu beschreiben<sup>1</sup>. Das Modell basiert auf künstlich erzeugten Stadtstrukturen und generiert Tagesabläufe einer synthetischen Stadtbevölkerung, die mit Energiebedarfen assoziiert werden. Das entwickelte Modell soll nach zukünftigen Erweiterungen eine Planungsunterstützung für städtische Entscheidungsträger ermöglichen. Für dieses langfristige Ziel wurde mit dem in dieser Arbeit konzipierten Simulationsmodell ein erster grundlegender Entwurf vorgelegt.

---

<sup>1</sup>Für diese Arbeit wurde vor allem die Nachfrage nach Elektrizität betrachtet. Das Modell ist jedoch so konzipiert, dass eine Energienachfrage nach Wärme bzw. Kälte schnell integriert werden kann.



# Abstract

The present work focuses on urban forms and the time budgets of individuals, which are two key factors influencing energy demand. The results of these analyses are integrated into a microsimulation tool that simulates energy fluxes within the urban household sector.

The thesis is divided into three major parts. The first part deals with urban form as a main determinant within the urban energy system. In this part, the causes of urban form changes as well as the influence of city layout on the usage of different forms of energy are described. This part includes a statistical analysis of about 130000 European urban settlements. Therefore a Matlab tool is developed for evaluating urban forms using Corine Land Cover raster data. The second part addresses the theme of time, describing the relation between time and cities. The central focus is time budget data, whose relevance for scientific questions related to energy usage is demonstrated. Implications of the 2000/2001 German national Zeitbudgeterhebung (time budget survey) for the simulations of the third part are evaluated. The third and last part integrates the former results about urban forms and time budgets into an artificial city microsimulation. The model simulates the activities of a synthetic population within a 24-hour time frame, then estimates the resulting energy demands. The framework conditions of such modelling approach as well as the methodology are described and first results are shown. Finally, an outlook for advanced modelling in this context is given.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung . . . . .	I
Abstract . . . . .	III
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.3 Aufbau und Methodik der Arbeit . . . . .	2
1.4 Nutzen . . . . .	3
<b>2 Urbane Form - Eine Einflussgröße im Energiesystem</b>	<b>6</b>
2.1 Das Urbane System . . . . .	9
2.2 Urbane Form - Wärme- und Kältesektor . . . . .	12
2.3 Urbane Form - Elektrizitätssektor . . . . .	14
2.4 Urbane Form - Verkehrssektor . . . . .	15
<b>3 Urbane Formenanalyse europäischer Siedlungen</b>	<b>20</b>
3.1 Datengrundlage und Aufbereitung . . . . .	21
3.2 Methodik . . . . .	28
3.3 Binärbildanalyse (Formbestimmung mittels morphologischer Operatoren)	31
3.4 Siedlungsparameter für urbane Formen . . . . .	35
3.5 Werkzeug zur Erfassung der Siedlungsformen . . . . .	44

3.6	Auswertung der Formanalyse für Europa . . . . .	50
3.6.1	Siedlungsgrößen im Überblick . . . . .	50
3.6.2	Analyse der Siedlungsgrößenverteilung . . . . .	55
3.6.3	Gemeinsame Auswertung der Continuous und Discontinuous Klassifikationen . . . . .	58
3.6.4	Auswertung der Continuous Urban Fabric . . . . .	63
3.6.5	Ranggrößenregel . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Die Komponente Zeit für die Modellierung von Aktivitäten</b>	<b>70</b>
4.1	Zeitgeographie . . . . .	70
4.1.1	Raum-Zeit-Beschränkungen . . . . .	71
4.1.2	Konzept und Visualisierung . . . . .	72
4.2	Stadt und Zeit . . . . .	74
4.3	Zeitverwendung . . . . .	76
4.3.1	Zeitbudgetstudie 2001/2002 . . . . .	77
4.3.1.1	Tagesaktivitätenfragebogen . . . . .	79
4.3.1.2	Personenfragebogen . . . . .	80
4.3.1.3	Haushaltsfragebogen . . . . .	80
4.3.2	Zeitverwendungsstudie - Datenauswertung . . . . .	81
4.3.2.1	Verteilung der Außer-Haus-Aktivitäten . . . . .	81
4.3.2.2	Anzahl und Verteilung von Aktivitäten im Tagesverlauf . . . . .	85
4.3.2.3	Variabilität von Tagesabläufen . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Mikrosimulation - Tagessimulation(24h) - Aktivitäten mit Energiebezug</b>	<b>94</b>
5.1	Individuenbasierte Modellierung . . . . .	95
5.2	Aktivitätenbasierte Modellierung . . . . .	97
5.3	Ausgangspunkt urbaner Aktivitätensimulationen . . . . .	102
5.3.1	Innere Rahmenbedingungen für urbane Modellierungen . . . . .	103
5.3.2	Äußere Rahmenbedingungen für urbane Modellierungen . . . . .	108
5.3.3	Klassifikation der Simulationssubjekte . . . . .	110
5.3.4	Entscheidungsträger (Individuen versus Haushalte) . . . . .	113
5.4	Modell zur Abschätzung veränderter Energieverbräuche unter Berücksichtigung städtischer Formen und veränderter Zeitbudgets . . . . .	116
5.4.1	Modellübersicht . . . . .	116
5.4.2	Räumliche Auflösung des Modells . . . . .	118
5.4.3	Zeitliche Auflösung des Modells . . . . .	118

5.4.4	Inhaltliche Abgrenzung . . . . .	119
5.4.5	Modell-Eingabe . . . . .	120
5.4.6	Modell-Vorverarbeitung . . . . .	124
5.4.7	Modellklassen . . . . .	128
5.4.7.1	Klasse Agent . . . . .	128
5.4.7.2	Klasse Haushalt . . . . .	130
5.4.7.3	Klasse Umwelt . . . . .	131
5.4.7.4	Weitere Hilfsklassen . . . . .	133
5.4.8	Modell-Verarbeitung . . . . .	133
5.4.8.1	Aktivitätenfestlegung . . . . .	134
5.4.8.2	Ort der Aktivität . . . . .	141
5.4.8.3	Verkehrsmittelwahl . . . . .	142
5.4.8.4	Dauer der Aktivität . . . . .	143
5.4.9	Kopplung von Aktivitäten mit Energieverbräuchen . . . . .	145
5.4.10	Modellausgabe - GIS-Schnittstelle . . . . .	147
5.4.11	Modellergebnisse . . . . .	149
5.4.11.1	Szenario 1 . . . . .	150
5.4.11.2	Szenario 2 . . . . .	154
5.4.12	Modellbewertung . . . . .	157
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>159</b>
	<b>Anhang</b>	<b>161</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>191</b>

# Abbildungsverzeichnis

0.1	Aufbau der Arbeit . . . . .	I
2.1	Beispiele unterschiedlicher Siedlungsformen in Europa . . . . .	8
2.2	Wirkungsgeflecht im urbanen System . . . . .	10
2.3	Beziehung zwischen urbaner Form und Energie . . . . .	11
2.4	Anteil des motorisierten Individualverkehrs für verschiedene Städte . . . .	16
2.5	Urbane Dichte und Energieverbrauch im Verkehrssektor . . . . .	18
3.1	CORINE-Landnutzungsdaten . . . . .	21
3.2	Partitionierung der Landnutzungsflächen . . . . .	24
3.3	CORINE-Siedlungsdaten am Beispiel von Berlin . . . . .	25
3.4	Urban Atlas Landnutzungsdaten am Beispiel von Budapest . . . . .	28
3.5	Von-Neumann und Moore-Nachbarschaften . . . . .	29
3.6	Datengewinnung durch Verschneidung . . . . .	30
3.7	Ellipse als Kompaktheitsindikator . . . . .	37
3.8	Indikatorunzulänglichkeit anhand von Vergleichsobjekten . . . . .	37
3.9	Siedlungsgradienten am Beispiel von Stockholm . . . . .	43
3.10	MATLAB Tool zur Erfassung von Siedlungsformen . . . . .	44
3.11	Graphische Auswahl des Untersuchungsgebietes . . . . .	46
3.12	Gesamtsicht über die Verteilung der Größe europäischer Siedlungsflächen	51
3.13	Boxplots der Siedlungsflächen europäischer Staaten . . . . .	52
3.14	Histogramme der Siedlungsgrößenverteilung einzelner Länder . . . . .	54
3.15	Verhältnis von Umfang und Fläche europäischer Siedlungen . . . . .	59
3.16	Entwicklungsprozess der Kochschen Schneeflocke . . . . .	59
3.17	Entwicklungsprozess eines Teragons . . . . .	60
3.18	Durchschnittliche Flächengröße aller Siedlungen . . . . .	61
3.19	Mittlere fraktale Dimension aller Siedlungsflächen . . . . .	61
3.20	Durchschnittliche Kompaktheit aller Siedlungsflächen . . . . .	62
3.21	Durchschnittliche Flächengröße dicht bebauter Siedlungen . . . . .	63

3.22	Mittlere fraktale Dimension dicht bebauter Siedlungsflächen . . . . .	64
3.23	Kompaktheit dicht bebauter Siedlungsflächen . . . . .	65
3.24	Zusammenhang zwischen Ranggrößen und logarithmischen Spiralen . . . .	67
4.1	Visualisierung von Zeitpfaden . . . . .	73
4.2	Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten im Tagesverlauf (personenbezogen) . .	83
4.3	Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten im Tagesverlauf (zeitbezogen) . . . .	84
4.4	Tätigkeitsanzahl nach Geschlecht und Wochentag . . . . .	86
4.5	Tätigkeitsanzahl nach Altersklassen . . . . .	87
4.6	Aktivitätsdauern im Tagesverlauf (männliche Personen) . . . . .	88
4.7	Aktivitätsdauern im Tagesverlauf (weibliche Personen) . . . . .	89
4.8	Aufsteigend sortierte Hamming-Ähnlichkeiten (Wochentage) . . . . .	90
4.9	Aufsteigend sortierte Dice-Koeffizienten (Wochentage) . . . . .	92
5.1	Mikrosimulation - Modellüberblick . . . . .	95
5.2	Säulen der individuenbasierten Modellierung . . . . .	96
5.3	Modell einer energetisch betrachteten Stadt . . . . .	105
5.4	Ablauf der Modellierung . . . . .	117
5.5	Energieverbrauch von Konsumenten in den USA . . . . .	120
5.6	Erzeugung urbaner Formen für die Mikrosimulation . . . . .	121
5.7	Ablauf der Modellverarbeitung . . . . .	133
5.8	Generierung der Tagestätigkeiten . . . . .	135
5.9	Standardlastprofile - Haushalt . . . . .	146
5.10	Urbane Form in Szenario 1 . . . . .	151
5.11	Tagestätigkeiten simulierter Agenten . . . . .	152
5.12	Tageslast eines Vier-Personenhaushaltes . . . . .	153
5.13	Elektrizitätsbedarf aller Haushalte im Tagesverlauf - Szenario 1 . . . . .	154
5.14	Urbane Form in Szenario 2 . . . . .	155
5.15	Elektrizitätsbedarf aller Haushalte im Tagesverlauf - Szenario 2 . . . . .	156
A1	Histogramme Siedlungsverteilung (BG,HR,CY,CZ) . . . . .	163
A2	Histogramme Siedlungsverteilung (DK,EST,FIN,F) . . . . .	164
A3	Histogramme Siedlungsverteilung (D,H,IS,IRL) . . . . .	165
A4	Histogramme Siedlungsverteilung (I,LV,LT,L) . . . . .	166
A5	Histogramme Siedlungsverteilung (MK,NL,N,PL) . . . . .	167
A6	Histogramme Siedlungsverteilung (P,RO,SRB,SK) . . . . .	168

A7	Histogramme Siedlungsverteilung (SLO,E,S,TR) . . . . .	169
A8	Ranggrößen (Deutschland,Polen) . . . . .	170
A9	Ranggrößen (Frankreich,Rumänien) . . . . .	170
A10	Ranggrößen (Schweden,Spanien) . . . . .	170
A11	Irland - Fraktale Dimension der Siedlungen . . . . .	171
A12	Sizilien - Fraktale Dimension der Siedlungen . . . . .	172
A13	Finnland - Fraktale Dimension der Siedlungen . . . . .	173
A14	Türkei - Fraktale Dimension der Siedlungen . . . . .	174

# Tabellenverzeichnis

3.1	CORINE2006 - erfasste Staaten . . . . .	22
3.2	CLC2000-Landnutzung . . . . .	23
3.3	Empirische $\chi^2$ Werte für Ländervergleiche . . . . .	56
3.4	Test auf Gleichheit der Mittelwerte (Wilcoxon-Test) . . . . .	56
3.5	Test auf Gleichheit der Mittelwerte (Median-Test) . . . . .	57
3.6	Test auf Gleichheit der Varianzen (Levene-Test) . . . . .	58
3.7	Schätzwerte für Trendfunktion (Ranggrößen) . . . . .	66
3.8	Flächenschätzwerte durch logarithmische Spirale . . . . .	67
4.1	Klassifikation der Aktivitäten in der Zeitbudgetstudie 2001/2002 . . . . .	78
5.1	Rahmenbedingungen einer Stadt . . . . .	109
5.2	Zustandsbeschreibung - Tagestätigkeiten . . . . .	136
5.3	Szenarienbeschreibung . . . . .	150
A1	CLC2000-Landnutzungsklassifikation(komplett) . . . . .	161



# Abkürzungsverzeichnis

API .....	Application programming interface
AVI .....	Audio Video Interleave
CLC .....	Corine Land Cover
CORINE .....	Coordination of Information on the environment
CRS .....	Coordinate Reference System
df .....	Degrees of freedom
DLR .....	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DMA .....	Data Mining-Architektur
DSM .....	Demand Side Management
EEA .....	European Environmental Agency
EPSG .....	European Petroleum Survey Group Geodesy
GAIA .....	Geographical Aware Intelligent Agents
GHD .....	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GIS .....	Geographisches Informationssystem
GMES .....	Global Monitoring for Environmental Security
GPS .....	Global Positioning System
GUI .....	Graphical User Interface
HTTP .....	Hypertext Transfer Protocol
IES .....	Institute for Environment and Sustainability
IKT .....	Informations- und Kommunikationstechnologie
INSPIRE .....	Infrastructure for Spatial Information in the European Community
IPF .....	Iterative proportional fitting
IPP .....	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
IPU .....	Iterative proportional updating

LGPL .....	GNU Lesser General Public Licence
MATLAB .....	MATrix LABoratory
MiD .....	Mobilität in Deutschland
MOLAND .....	Monitoring Land Use/Cover Dynamics
MORO .....	Modellvorhaben der Raumordnung
OBEUS .....	Object-Based Environment for Urban Simulation
OECD .....	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OSM .....	Open Street Map
PACT .....	Pathways for Carbon Transition
POI .....	Point of Interest
SDSS .....	Spatial Decision Support System
SEIS .....	Shared Environmental Information System
UBA .....	Umweltbundesamt
UTC .....	Coordinated Universal Time
V2G .....	Vehicle-to-Grid
VBA .....	Visual Basic for Application
VPP .....	Virtual Power Plant

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

In der Vergangenheit wurde Energie in der Geographie vor allem als Produktionsfaktor betrachtet und im Rahmen der Industriegeographie behandelt (vgl. [145], Schüssler). In den letzten Jahren beschäftigten sich geographische Forschungsarbeiten aber zunehmend umfassender mit dem Themenkomplex Energie, so dass sich derzeit die eigenständige Forschungsrichtung der Energiegeographie etabliert. Die wissenschaftliche Auseinandersetzung ist hier sehr weit gefasst. Sie reicht von der Analyse verfügbarer Ressourcen, über die Betrachtung von Energieerzeugungstechnologien bis hin zu Untersuchungen über Flächennutzung und Umweltbelastungen. Die aufkommende Bedeutung der Energiegeographie ist durch die großen Herausforderungen wie Klimawandel, schwindende fossile Energieträger oder auch durch die Fragen der zukünftigen Versorgungssicherheit begründet. Die Konzeption einer Energiegeographie mit dem Fokus der Betrachtung von Prozessketten wird dabei ausführlich durch Brücher beschrieben (vgl. [29], Brücher). Durch die vorliegende Arbeit soll ein weiterer Beitrag zu dieser noch „jungen“ Forschungsdisziplin geleistet werden.

Im Gegensatz zu den meisten Untersuchungen innerhalb der geographischen Energieforschung wird in der vorliegenden Arbeit die Nachfrageseite näher beleuchtet. Obwohl es auch auf der technologischen Seite vielfältigste Unsicherheiten, wie z.B. im Bereich der Ressourcenverfügbarkeit oder der Brennstoffkostenentwicklung gibt, kann die Verteilung und Erzeugung von Energie in derzeitigen Energiesystemmodellen relativ gut implementiert werden. Dagegen wird die Energienachfrage zumeist nur minimalistisch abgebildet, einfach in die Zukunft extrapoliert, konstant gelassen oder anderweitig festgelegt. Die eigentlichen verschiedenartigen Treiber der Energienachfrage wurden bislang nur unzureichend analysiert, so dass sie bisher weniger Eingang in Simulationsmodelle fanden. Um die bereits existierenden Simulationsmodelle zu verbessern, muss das Verständnis

für veränderte zukünftige Energiebedarfe im Zusammenhang mit auftretenden Unsicherheiten erweitert werden. Mit der Nachfrageseite im Energiesystem beschäftigte sich auch das FP7 Projekt Pathways for Carbon Transition (PACT) der europäischen Kommission an dem der Autor dieser Arbeit als Mitglied der Energie- und Systemstudiengruppe des Max-Planck-Institutes für Plasmaphysik beteiligt war. Ziel des PACT-Projektes ist es, Wege aufzuzeigen, wie eine  $CO_2$ -freie Energieversorgung in der Langfristperspektive (2050-2060) erreicht werden kann. Die Ausrichtung des Projektes basierte dabei auf der Erkenntnis, dass ein Verständnis der Energieerzeugung und der dafür verwendeten Technologien nicht ausreicht, um eine Energiewende hin zu einer nachhaltigen,  $CO_2$ -freien Gesellschaft zu ermöglichen.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zu einem besseren Verständnis der Energienachfrage zu leisten. Basierend auf bisherigen Forschungsarbeiten sollen die vielfältigen Zusammenhänge von Siedlungsform und Energiestruktur aufgezeigt werden. Weiterhin soll geklärt werden, wie Individuen ihre Zeit verbringen. In diesem Zusammenhang soll insbesondere geprüft werden, inwieweit Zeitbudgetdaten für energetische Betrachtungen nutzbar gemacht werden können. Da wie bereits beschrieben, die Nachfrageseite in derzeitigen Modellen zumeist nur unzureichend implementiert ist, sollen die Einflussfaktoren urbane Form und Zeitverwendung in eine Mikrosimulation integriert werden. Ziel des in dieser Arbeit erstellten Simulationsmodells ist es, bisherige Modellierungsansätze durch eine detaillierte Abbildung der Energienachfrageseite zu erweitern. Dabei soll der Einfluss der urbanen Form durch die Einbeziehung eines Geographischen Informationssystems (GIS) in das Simulationsmodell berücksichtigt werden. Die Zeitverwendung in Form von Tagesabläufen einer synthetisch generierten Stadtbevölkerung soll mit Energiebedarfen gekoppelt werden, um eine umfassendere Betrachtung zu ermöglichen.

## 1.3 Aufbau und Methodik der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel. In den ersten beiden Kapiteln wird die urbane Form und deren Bezug zum Energiesystem betrachtet. Dabei liefert Kapitel 2 eine theoretische Übersicht über das Beziehungsgeflecht im urbanen System und dessen Einfluss

auf die Energienachfrage im Elektrizitäts-, Wärme- und Verkehrssektor. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die urbanen Formen europäischer Siedlungen auf Basis von CORINE (Coordination of Information on the Environment) Landcover Daten analysiert. Dafür wird ein in MATLAB (MATrix LABoratory) eigens für die Datenerfassung entwickeltes Werkzeug vorgestellt. Anschließend erfolgt eine statistische Auswertung der erfassten Daten. Kapitel 4 behandelt die Themen Zeitgeographie und Zeitverwendung. In diesem für die spätere Simulation grundlegenden Kapitel wird der Faktor Zeit im städtischen Kontext beleuchtet. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt jedoch in der Betrachtung von Zeitbudgets. Dabei werden Daten der Zeitbudgeterhebung von 2000/2001 im Hinblick auf die in Kapitel 5 beschriebene Mikrosimulation ausgewertet. Das letzte Kapitel fasst die untersuchten Einflussfaktoren, urbane Form und Zeitverwendung, in einem Simulationsmodell zusammen. Dieses Simulationsmodell ermöglicht die Abbildung von Energieflüssen im Haushaltssektor, in dem die Tagesaktivitäten der im Modell abgebildeten Agenten mit Energiebedarfen gekoppelt werden. Hierzu wurde eine objektorientierte Programmierung in C# umgesetzt, in der methodisch Markovketten und *computational process modelling* zum Einsatz kommen<sup>2</sup>. Die Arbeit schließt mit der Bewertung des erstellten Modells und einem Ausblick, der weiteren Forschungsbedarf aufzeigt.

## 1.4 Nutzen

Da bisherige Forschungsansätze im Bezug auf urbane Formen hauptsächlich einzelne Aspekte betrachten beziehungsweise Einzelfallstudien beschreiben, liegt ein Wert dieser Arbeit in der umfassenden Darstellung von urbaner Form und ihrem Einfluss auf die Energienachfrage. In diesem Zusammenhang wird die urbane Formenvielfalt durch die Auswertung europäischer CORINE-Daten analysiert. Dabei werden mehr als 130000 Siedlungen aller bei CORINE partizipierenden Länder erfasst und mit Hilfe verschiedener Kennzahlen charakterisiert. Der Nutzen dieser Untersuchung liegt in der Schaffung einer breiten Datenbasis, die für weiterführende Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Siedlungsstruktur auf die Energieversorgung verwendet werden kann. Damit bleibt die Kopplung von konkreten urbanen Formen mit realen energetisch relevanten Kenngrößen, wie z.B. der Elektrizitätsnachfrage, nachfolgenden Forschungsarbeiten überlassen.

---

<sup>2</sup>Im Rahmen des Gesamtprozesses der Erzeugung künstlich generierter Tagesaktivitäten handelt es sich ganz allgemein um einen stochastischen Prozess und nicht mehr speziell um Markovketten.

Ein weiterer Wert von Formanalysen liegt darin, ähnliche Siedlungsstrukturen hinsichtlich festzulegender Kriterien bestimmen zu können. Dafür wurde ein entsprechendes Werkzeug entwickelt und eine fundierte Basis für weitere Forschung in diesem Bereich geschaffen.

Da sowohl die Energienachfrage als auch die Energiebereitstellung im zeitlichen Kontext betrachtet werden müssen, liefert die Analyse von Zeitstrukturen und Zeitbudgetdaten eine inhaltliche Grundlage für die im letzten Teil der Arbeit beschriebene Mikrosimulation. Zeitbudgetdaten im Zusammenhang mit energetisch relevanten Fragestellungen wurden in bisherigen Forschungsarbeiten nur sehr eingeschränkt oder nur statisch verwendet. Der Nutzen der Zeitbetrachtung besteht demnach darin, aufzuzeigen wie Zeitbudgetdaten für die Energieforschung nutzbar gemacht werden können. Die Analyse der Zeitbudgetdaten gibt darüber Aufschluss, wie Menschen ihre Zeit verbringen und wie variabel Tagesabläufe sind. Diese Informationen können für Plausibilitätsbetrachtungen und die Validierung von Aktivitätensimulationen herangezogen werden.

Der wissenschaftliche Nutzen der Tagesaktivitätensimulation ist im Modell selbst begründet, da derzeit ein Mangel an adäquaten Werkzeugen im Bereich der urbanen Mikrosimulation mit Energiebezug besteht. Da der Mikrosimulation kein realer Raum mit entsprechenden Daten zugrunde liegt, ist sie für konkrete planerische Maßnahmen bisher nicht geeignet. Jedoch wird ein langfristiger praktischer Nutzen darin gesehen, mit diesem Modellierungsansatz unter Einbeziehung realer Datengrundlagen eine Planungsunterstützung zu ermöglichen. Für dieses Ziel wurden in der vorliegenden Arbeit erste Schritte getätigt, in dem ein Modellierungsansatz entwickelt wurde, der vielfältige Parameter berücksichtigt und Schnittstellen beispielsweise zur Einbindung geographischer Informationssysteme in der programmiertechnischen Umsetzung beschreibt.

Viele der aktuellen energierelevanten Fragestellungen können ohne räumliche und zeitliche Betrachtung nicht beantwortet werden. Netzausbau, *Smart Metering* und die Möglichkeiten von Lastverschiebungen sind in diesem Zusammenhang aktuelle Themengebiete. Aber auch im Verkehrssektor stellt sich zum Beispiel im Bereich der Elektromobilität unter dem Stichwort *Vehicle to Grid* die Frage, wann und wo Fahrzeuge geladen werden können. Die Analyse von Tagesaktivitäten ist demnach essentiell. Durch Simulationen können die Auswirkungen möglicher Veränderungen der Tagesaktivitäten abgebildet werden. Diese Veränderungen beeinflussen die Energienachfrage und somit auch die Möglichkeiten der Lastverschiebung.

Die Prognose von Lastflüssen und deren Verteilung ist hierbei ein gutes Beispiel für die Einbettung in eine Data Mining-Architektur (DMA) (vgl. [125], Petersohn).

Mikrosimulationen, insbesondere unter Einbeziehung von Siedlungsformen und unter Berücksichtigung von Tagesaktivitäten, stellen demnach eine Möglichkeit dar, zukünftige Entwicklungen für den Energiesektor abzuschätzen.

## 2 Urbane Form - Eine Einflussgröße im Energiesystem

In diesem Kapitel wird der Begriff der urbanen Form erläutert und ihre Bedeutung für Energiesysteme<sup>3</sup> dargelegt. Dabei wird einerseits auf die Treiber, die Formveränderungen auslösen und andererseits auf die Zusammenhänge hinsichtlich der Energieformen Wärme und Elektrizität eingegangen. Der Verkehrssektor mit zugrundeliegender Energienachfrage wird ebenfalls behandelt. Nach Raith beschreibt der Begriff Form nicht nur die Stadtstruktur sondern auch inwieweit etwas in Form ist (vgl. [130], Raith). Demnach beinhaltet Form auch die Leistungsfähigkeit von Strukturen. Für Raith sind Reichhaltigkeit, Zeithaltigkeit, Nachhaltigkeit, Sinnhaltigkeit und Bauen Formprobleme der Stadt. Nachfolgend wird von der umfassenden Auffassung von Form abgesehen und Form lediglich im einfachen Sinne gebraucht. Form beschreibt demnach Dichte (z.B. Bevölkerungsdichte, Gebäudedichte), Verteilung (z.B. Verteilung von Wohnraum) sowie ganz allgemein Ausdehnung und eigentliche Form einer Siedlung (Geometrie). Zur Form zählen aber auch Gebäudetypen, Transportinfrastruktur oder Landnutzungsverteilung innerhalb einer Siedlung. Diese vielfältigen Aspekte können wiederum durch verschiedenste Indikatoren näher bestimmt werden. Verschiedene Indikatoren sind in diesem Zusammenhang z.B. bei Jenks und Jones zu finden (vgl. [84], Jenks u. Colin). Für Lynch ist die Frage nach der Definition der urbanen Form zentral (vgl. [108], Lynch). Er sieht deren Abgrenzung als schwierigen Schritt an, da auch Dinge wie z.B. lebende Organismen, Sozialstruktur, das ökologische System oder die Aktivitäten der Menschen in den Begriff Form integriert werden könnten. Eine Übersicht über urbane Siedlungsmodelle (lineare Stadt, fragmentierte Stadt,...) und somit Formen, werden mit Eigenschaften, Treibern und Kritikpunkten von Lahti beschrieben (vgl. [102], Lahti).

---

<sup>3</sup>Der Begriff Energiesystem wird in dieser Arbeit nicht streng wissenschaftlich definiert. Energiesystem steht demnach allgemein für die Energieerzeugungsmöglichkeiten (Technologien) aber auch für die Energienachfrage (dabei hat die erwartete Nachfrageentwicklung natürlich wieder Auswirkungen auf die Verwendung von Technologien).



Urbane Formen<sup>4</sup> im Zusammenhang mit Energiesystemen sind derzeit von aktuellem Forschungsinteresse. So behandelt die Hauptforschungsfrage einer Zusammenarbeit britischer Forschungseinrichtungen (CityForm-The Sustainable Urban Form Consortium) das Thema Nachhaltigkeit (*To what extent and what ways does urban form contribute to sustainability?*)<sup>5</sup>. Die Frage nach dem Energieverbrauch ist Teil dieser Nachhaltigkeitsanalysen. Nachhaltigkeit in Zusammenhang mit urbaner Form wird unter anderem von folgenden Autoren analysiert (vgl. z.B. [81] Jabareen, [83] Jenks u. a. oder [84] Jenks u. Colin). Der Zusammenhang zwischen urbaner Form (Bebauungstypen) und Energienachfrage wurde u.a. von Baker untersucht (vgl. [7], Baker u. a.). Das IPCC betont in seinem Bericht aus dem Jahr 2007 die vielfältigen Zusammenhänge und Einflüsse zwischen Siedlungsform und Energie (z.B. Verschattung bei dichter Bebauung, Auswirkungen auf den Modal Split,...) (vgl. [104], Levine u. a.). Baker et al. betonen, dass urbane Formen einen Einfluss auf den Lebensstil von Haushalten haben und somit die Energienachfrage potentiell beeinflusst wird.

Die Betrachtung von urbanen Formen ist alt, da sie einhergeht mit dem Begriff der Stadtplanung. Ein griechischer Stadtplaner aus dem 5. Jh. v. Chr. war Hippodamus von Milet. Auf ihn geht das Hippodamische Schema zurück, in das Ideen der Gleichheit (Isonomia) einfließen. In der nachfolgenden Abbildung 2.1 sind exemplarisch Siedlungsformen aus verschiedenen europäischen Ländern und Epochen dargestellt. Diese Abbildung verdeutlicht die existierende geometrische Formenvielfalt bei europäischen Siedlungen. Die Bilder sind OpenStreetMap als Screenshots entnommen. Die abgebildeten Siedlungen sind bis auf Nördlingen Planstädte. Neuf-Brisach und Palmanova wurden als Festungstädte errichtet. Ihre Gründungen fallen in die Epochen des Barock bzw. der Renaissance. Es sind idealtypische Städte. Sie stellen mit dieser bis heute erhaltenen Form Ausnahmen in Europa dar.

Zeitliche Überprägungen bewirken, dass Siedlungen - bis auf Ausnahmen - nicht so prägnant geformt sind wie in Abbildung 2.1. Aufgrund seiner wechsel- und vielseitigen Geschichte, sind heute in Europa unterschiedliche urbane Formen innerhalb einer Siedlung erkennbar. Die urbanen Formen einer Stadt repräsentieren verschiedene Jahrhunderte und mit ihnen auch kulturelle, wirtschaftliche und politische Verhältnisse im Zeitkontext. Nördlingen ist eine mittelalterlich geprägte Stadt. Der Stadtgrundriss ist

---

<sup>4</sup>Aktuelle Forschungsergebnisse sind z.B. der Zeitschrift *Urban Morphology* zu entnehmen ([www.urbanform.org](http://www.urbanform.org)). Es sind dort auch Studien zu einzelnen Ländern zu finden. Daneben bietet das *International Seminar on urban Form* (ISUF) aktuelle Studien ([www.isuf2010.de](http://www.isuf2010.de)).

<sup>5</sup>Informationen zur Forschungsthematik sind zu finden unter folgender Adresse: [www.cityform.org/uk/index.html](http://www.cityform.org/uk/index.html)

in etwa kreisförmig. Die typischen kreisförmigen Grundrisse des Mittelalters erklären sich durch die Befestigungsanlagen (Stadtmauer, Türme, Bastionen,...), die mit hohen Kosten verbunden waren. Die aufzuwendenden finanziellen Mittel konnten bei Nutzung der Kreisform minimiert werden. Milton Keynes ist dagegen eine sehr junge Planstadt. Sie wurde in den 1960er Jahren gebaut. In dem Teilausschnitt der Stadt ist die geplante Wohnbebauungsform als auch die Trennung hin zu einem Gewerbe-/Industriegebiet zu erkennen<sup>6</sup>. Die historische Entwicklung urbaner Formen kann im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert werden. Sie ist für viele Jahrhunderte sehr ausführlich und gut bei Morris und auch Kostof beschrieben (vgl. [97] Kostof, [115] Morris).

**Abbildung 2.1:** Beispiele unterschiedlicher Siedlungsformen in Europa



Quelle: OpenStreetMap - links oben: Neuf-Brisach (Frankreich), rechts oben: Palmanova (Italien), links unten: Nördlingen (Deutschland), rechts unten: Milton Keynes (Großbritannien)

Seit dem 19. Jahrhundert gibt es einige geographische Stadtmodelle (Radialkonzentrische Stadt Kohl 1841, Bandstadt Mata 1882, Ringmodell Burgess 1925, Sektorenmodell Hoyt 1939, Mehrkerne-Modell Hariss und Ullmann 1945). Auf die drei letztgenannten Modelle wird im Rahmen der Simulation noch einmal hingewiesen. Die Modelle beschreiben Landnutzungen und versuchen diese zu erklären. Die Bandstadt, als Ausnahme unter

---

<sup>6</sup>Noch besser sind die urbanen Formen bei google maps oder auch bei bing maps ersichtlich. Da diese Quellen auf Grund der bestehenden rechtlichen Bedingungen nicht genutzt werden können, wurde für die Abbildung OpenStreetmap als Quelle gewählt.

den genannten Modellen, versucht wie auch die Gartenstadt, Probleme existierender Siedlungen zu lösen. Sie ist ein Modell einer anzustrebenden Stadtentwicklung.

Zusammenfassend lässt sich herausstellen, dass sehr verschiedene Wissenschaftsdisziplinen an dem Thema Siedlungsformen forschen, so z.B. die Geographie, die Raumplanung oder die Architektur. Nicht zuletzt werden urbane Formen im Städtebau betrachtet (vgl. z.B. Charta des new urbanism von 1996). Es gibt jedoch auch wissenschaftliche Abhandlungen aus weniger offensichtlichen Wissenschaftsdisziplinen wie z.B. der Mathematik (fractal cities) oder der Physik (synergetic/sociodynamic). Aus dieser Vielfalt kristallisierten sich jedoch Arbeiten heraus, die einen hohen Bekanntheitsgrad aufweisen. Zu diesen *Klassikern* gehören nach Talen und Ellis (vgl. [157] Talen u. Ellis) die Arbeiten von Jacobs, Lynch und Kostof (vgl. [82] Jacobs, [107] Lynch, [97] Kostof).

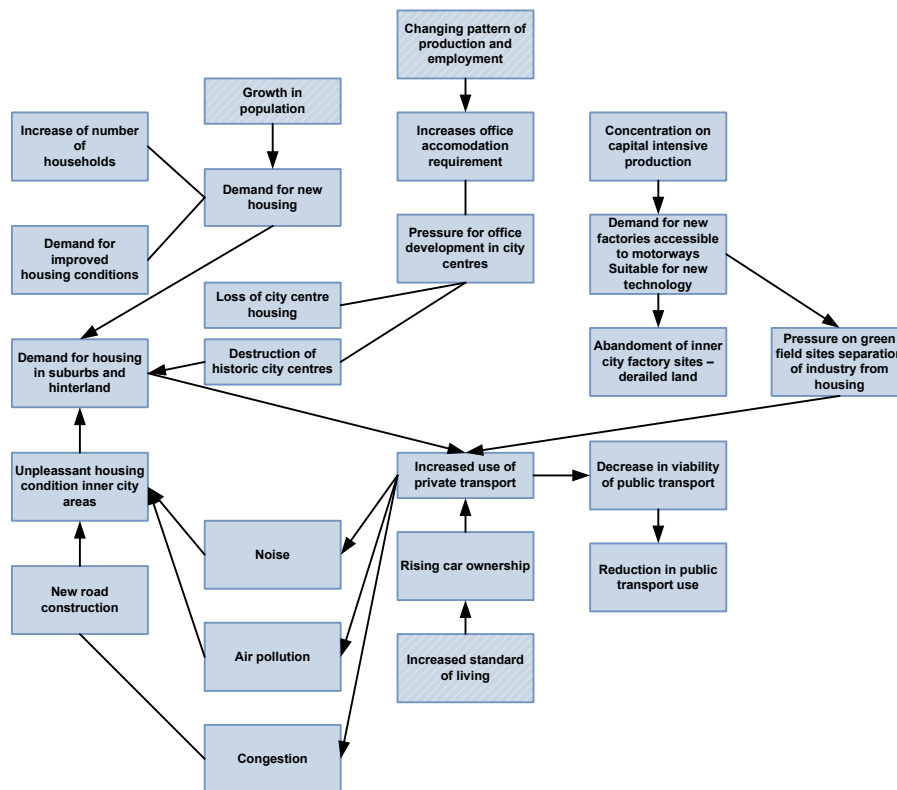
Im nächsten Kapitel folgt eine nähere Beschreibung der Zusammenhänge in urbanen Systemen mit dem Schwerpunkt Energie.

## 2.1 Das Urbane System

Da die Form und die Struktur von Siedlungen sowie deren Dynamik Auswirkungen auf das vorhandene Energiesystem haben, ist es notwendig die Auslöser von formverändernden Prozessen zu kennen. Daher werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Faktoren im urbanen System dargestellt, die einen Einfluss auf die urbane Form haben. Die folgende Abbildung (2.2) zeigt hierzu die wesentlichen Wirkungszusammenhänge auf. Im Original entstammt diese Abbildung dem *Green Paper of urban environment* der Europäischen Kommission aus dem Jahr 1990.

Schraffiert hinterlegt sind die Treiber, die die Dynamik im System begründen. Dies wären nach der Abbildung die Bevölkerungsänderung, der Wandel in Produktion und Beschäftigung sowie der veränderte Lebensstandard. In Anlehnung an die Abbildung müsste heute der Dienstleistungssektor stärker betont werden. Weiterhin beeinflusst die Beschäftigungssituation den Lebensstandard. Die Grafik könnte daher beliebig ergänzt und verfeinert werden und veranschaulicht die Komplexität und Vielfalt innerhalb urbaner Systeme. Die in Abbildung 2.2 dargestellten Zusammenhänge gelten jedoch oft nur unter bestimmten Voraussetzungen und häufig ist auch die Richtung einzelner Zusammenhänge nicht geklärt. Über die Stärke von Zusammenhängen sagt die Grafik ebenfalls nichts aus.

Abbildung 2.2: Wirkungsgeflecht im urbanen System



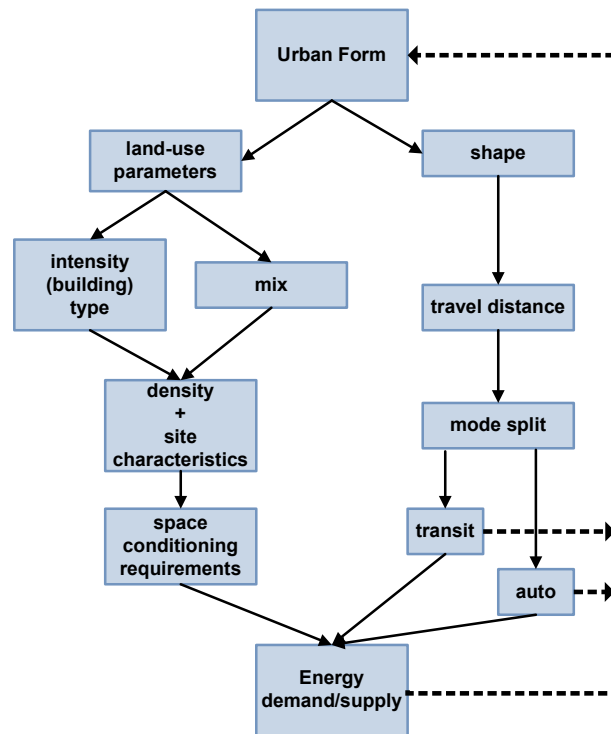
Quelle: nach Abbildung der Europäischen Kommission (vgl. [40], Commission of the European Communities)

Die vorliegende Abbildung suggeriert beispielsweise, dass ein steigender Lebensstandard zu einem vermehrten Autobesitz führt. Ein kausaler Zusammenhang besteht in dieser Beziehung jedoch nicht, so dass ein steigender Wohlstand nicht zwangsläufig mit einer steigenden Nachfrage nach PKWs einhergeht. Durch einen Wertewandel hin zu mehr Umweltbewusstsein, könnte die Bedeutung des eigenen Automobils sogar abnehmen. Des Weiteren führt steigender Autobesitz laut der Abbildung zu mehr Lärm, Luftverschmutzung und Staus. Verbesserte Technologien können diese Auswirkungen aber stark reduzieren. Intelligente Verkehrsleitetechnologien haben das Potential, die Stauproblematik zu vermindern. Zukünftige Elektroautos führen zu keiner Luftverschmutzung (bzw. zu Luftverschmutzung an anderen Orten, falls die benötigte Elektrizität nicht regenerativ bereitgestellt werden kann). Auch die Lärmbelastung ist bei Elektroautos vernachlässigbar. Diese beispielhafte Andeutung soll vergegenwärtigen, dass die Beziehungszusammenhänge kritisch zu hinterfragen sind und ihre Bedeutung über die Zeit nicht konstant bleiben muss. Die mit den Städten verbundene Komplexität, sowie Herangehensweisen

zu deren Beherrschung sind z.B. bei Batty beschrieben (vgl. [10], Batty).

Die Beziehungen im urbanen System unter expliziter Berücksichtigung der urbanen Form und der Energienachfrage stellte Rygole (vgl. [138], Rygole) bereits 1978 dar (vgl. Abb. 2.3). Nach Rygole gibt es eine direkte Rückkopplung der Energienachfrage und des Energieangebotes auf die Formausprägung einer Stadt.

**Abbildung 2.3:** Beziehung zwischen urbaner Form und Energie



Quelle: nach Abbildung von Rygole (vgl. [138], Rygole)

Der Einfluss der urbanen Form auf den Energiebedarf wurde von Ratti untersucht. Er analysiert dazu den Energiebedarf von Gebäuden. Bei vergleichbaren Gebäuden kann der Gebäudeenergiebedarf um den Faktor 20 variieren. Faktor 10 kann durch die Faktoren Gebäudedesign (Faktor 2.5), Systemeffizienz (Faktor 2) und Bewohnerverhalten (Faktor 2) erklärt werden. Nach Ratti könnte die urbane Geometrie den fehlenden Faktor 2 erklären (vgl. [131], Ratti u. a.).

Es zeigt sich, dass die urbane Form Auswirkungen sowohl auf die Möglichkeiten der Energiebereitstellung als auch auf die Energienachfrage hat. Alle Energiebereiche (Wärme,

Kälte, Elektrizität, Verkehr) sind hierbei betroffen. Ein Zitat von Raydan und Steemers (vgl. [132], Raydan u. Steemers, S.2) fasst die Problemlage urbaner Entwicklung, insbesondere im Hinblick auf das Thema Energie, sehr gut zusammen: “*Cities of the industrial era have consciously excluded natural processes, substituting mechanical devices made possible by intensive use of fossil fuels. Rather than using the solar energy falling on their streets and buildings, they dissipate it as excess heat. At the same time they import immense quantities of concentrated energy in various forms, most of it derived from the petroleum coaxed from the ground in distant landscapes... Thus, we might see our overwhelming problems of depletion and pollution as largely outgrowths of our ways of shaping the urban environment.*“

In den nächsten Abschnitten werden daher die Zusammenhänge zwischen urbaner Form und den erwähnten Energiebereichen genauer beschrieben.

## 2.2 Urbane Form - Wärme- und Kältesektor

In der Stadtplanung ist das Thema Energie in der näheren Vergangenheit stark vernachlässigt worden. So wird Energie in planungsrelevanten Fachbüchern nicht (vgl. [1] Albers, [79] Humpert oder [128] Prinz) oder nur sehr eingeschränkt (vgl. z.B. [25], Braam) behandelt. Es sind jedoch auch frühere Forschungen über dieses Thema aus den 70er und 80er Jahren des vorherigen Jahrhunderts zu finden (vgl. z.B. [63], Gilbert u. Dajani bzw. [122], Owens). Nach Raydan weist Owens (vgl. [123], Owens) jedoch darauf hin, dass energiebewusste Planung keine exakte Wissenschaft ist, viele Unsicherheiten bestehen, und daraus folgend keine Strukturen bekannt sind, welche unter allen denkbaren Umständen zukünftig energieeffizient sind (vgl. [132], Raydan u. Steemers). Nach Owens hängt der Erfolg von energieeffizienter Planung nicht nur von technischen Verbesserungen sondern auch von Akzeptanz, kultureller Integration und wirtschaftlicher Machbarkeit ab (vgl. [122], Owens). Im Zuge der Klimadiskussionen bekam und bekommt das Thema Stadt und Energie wieder mehr Gewichtung. So verabschiedete z.B. der deutsche Städtetag 2008 ein Positionspapier zum Thema Klimaschutz, in welchem die Rolle der Städte in diesem Zusammenhang beleuchtet wird. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) initiierte den Wettbewerb *Energieeffiziente Stadt*, bei dem die 2. Phase 2010 abgeschlossen wurde. Wie angesprochen hat die Gebäudestruktur einen großen Einfluss auf die Energienachfrage. Dies zeigt, dass der energetischen Stadtplanung eine zentrale Rolle zukommt, insbesondere um energiearme Verbrauchsstrukturen



zu erzeugen. Hamacher<sup>7</sup> spricht sogar davon, dass die energetischen Stadtplanung eine Schlüsseltechnologie im 21. Jahrhundert sein wird. Tereci et al schätzen, dass 10% bis 20% des Wärme- und Kühlbedarfs einer Stadt durch eine geeignete Bebauungsstruktur eingespart werden (vgl. [159], Tereci u. a.).

Wärme wird vor allem als Raumwärme und zur Erzeugung von Warmwasser benötigt. Daneben wird im Niedertemperaturbereich auch Prozesswärme gebraucht. Höhere Temperaturen, die von bestimmten Industrieprozessen verlangt werden, spielen auf Grund des geringen Vorkommens von Industrieanlagen in städtischer Umgebung zumeist eine geringe Rolle. Im Gegensatz zur Wärmeversorgung<sup>8</sup>, die auf Grund verbesserter Wärmedämmung<sup>9</sup> langfristig an Bedeutung verlieren kann, wird die benötigte Energiemenge zur Kühlung auf Grund steigender Komfortansprüche als auch erwarteter, durch den Klimawandel hervorgerufener, erhöhter Außentemperaturen voraussichtlich steigen. Der Primärenergiebedarf ist durch die Gebäudestruktur, die Gebäudenutzungsverhältnisse, das menschliche Verhalten, die Komfortansprüche als auch durch die verwendeten Energieerzeugungs- und Verteilungssysteme determiniert. Als externer Faktor haben die Außentemperaturen einen Einfluss auf die Energienachfrage (zum Vergleich von jährlichen Energienachfragen ist deshalb eine Temperaturbereinigung notwendig).

Das Verhältnis von Gebäudehüllfläche zu Gebäudevolumen ( $A/V$ ) ist eine wichtige Kennzahl für den Heizwärmebedarf von Gebäuden, da Transmissionsverluste über die Außenflächen auftreten. Energetisch günstiger sind bei gleichem Volumen, Gebäude mit kleinerer Gebäudehüllfläche. Everding gibt typische  $A/V$ -Verhältnisse für verschiedene Haustypen an (vgl. [54], Everding). Auch die Verschattung und die Gebäudeausrichtung (solare Gewinne) haben Einfluss auf den Heizwärmebedarf (vgl. z.B. [155], Österreichische Raumordnungskonferenz). Eine erhöhte Bebauungsdichte/kompakte Bauweise senkt zwar prinzipiell den Wärmebedarf, führt aber andererseits mitunter zu einem erhöhten Kühlbedarf im Sommer. Dichte Bebauungen sind für leitungsgebundene Versorgungen (z.B. Fernwärme) notwendig, um wirtschaftlich operieren zu können, schließen mitunter aber andere gewünschte Technologien (z.B. Photovoltaik-Fassaden) aus. Dies ist ein Beispiel für ein sich widersprechendes Vorgehen hinsichtlich eines Planungsziels im städtischen Energiemarkt (innere Verdichtung vs. solare Nutzung). Eine optimale Bebauungsdichte kann im Allgemeinen nicht angegeben werden. Darüber hinaus beeinflusst

---

<sup>7</sup>Vortrag auf der viennergy 2008 in Wien - [www.viennergy.com/Praesentationen/-Viennergy2008\\_hamacher.pdf](http://www.viennergy.com/Praesentationen/-Viennergy2008_hamacher.pdf)

<sup>8</sup>Unter Wärme ist hier Niedertemperaturwärme zu verstehen. Prozesswärme wird nicht betrachtet.

<sup>9</sup>In Deutschland ist in diesem Zusammenhang z.B. die Entwicklung der EnEV (Energieeinsparverordnung) als Teil des Baurechts zu beachten.

die Bebauungsstruktur die Herausbildung von Wärmeinseln. Diese bilden sich in urbaner Umgebung auf Grund der Wärmespeicherung der verwendeten Baumaterialien und verminderter Verdunstung aus. Gemessene Temperaturunterschiede zwischen der Stadt und ihrem Umland in Abhängigkeit von der Siedlungsgröße, hier angegeben als Bevölkerungsanzahl, können beachtlich schwanken (vgl. [179], Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg). In der Städtebaulichen Klimafibel des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg wird ein direkter Zusammenhang von Siedlungsgröße und Ausbildung von Wärmeinseln (Temperaturdifferenz) beschrieben. Santamouris zeigt, dass sich Wärmeinseln tageszeitlich als auch jahreszeitlich sehr unterschiedlich für verschiedene Städte in Europa herausbilden (vgl. [141], Santamouris). Für verschiedene Hauptklimabedingungen arbeitete Golany (vgl. [64], Golany) urbane Formen heraus, die diesen am besten entgegenkommen (z.B. kompakte Bauweise bei heißen trockenen Klimabedingungen).

## 2.3 Urbane Form - Elektrizitätssektor

Die Elektrizität ist von der Ausgestaltung urbaner Formen weniger betroffen als die anderen Sektoren, zumindest im Bereich der Energienachfrage. Bei der Energieerzeugung ist die Bebauungsdichte zu beachten. So ist für die innerstädtische Nutzung von Photovoltaikanlagen (Dach- und Fassadennutzung) Verschattung ein begrenzender Faktor. Des Weiteren kann in Städten auch Energie durch Kleinwindkraftanlagen, die Nutzung von Wasserkraft oder die Nutzung von Geothermie gewonnen werden. Inwieweit die Nutzung dieser Möglichkeiten von Aspekten der Bebauungs- bzw. Bevölkerungsdichte abhängt, kann derzeit nicht abschließend beantwortet werden, da dies stark von technologischen Auslegungen abhängen wird. Die Möglichkeiten erneuerbarer Energien im Stadtraum mit besonderer Berücksichtigung der städtischen Freiflächen werden durch das ExWoSt<sup>10</sup> thematisiert (vgl. [35], Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung u. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung sowie [36], Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung u. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung).

Ein Trend beim Elektrizitätsbedarf von Haushalten ist nicht so eindeutig ersichtlich, wie im Bereich der Niedertemperaturwärme. Neue Haushaltstechnologien, Strompreise aber auch steigende Energieeffizienz von Technologien beeinflussen die Nachfrage. Die

---

<sup>10</sup>ExWoSt: Forschungsprogramm des Bundes - Experimenteller Wohnungs- und Städtebau



meisten EU-27 Länder verzeichneten in den letzten Jahren (2000-2009) im Haushaltsbereich eine - mitunter stark - steigende Stromnachfrage (z.B. Frankreich und Spanien). Es gibt aber auch Länder, in denen die Stromnachfrage in den letzten Jahren eher als konstant betrachtet werden kann (z.B. Deutschland). In Schweden sank in vielen Jahren die Stromnachfrage sogar. Im Vergleich zum Jahr 2000 verbrauchten im Jahr 2009 nur 3 von 31 Ländern (EU-27, Norwegen, Schweiz, Kroatien, Türkei) weniger Elektrizität im Haushaltsbereich. Wählt man 2005 als Bezugsjahr sind es 9 Länder, die 2009 weniger Elektrizität benötigten<sup>11</sup>. Ein Grund für steigende Strombedarfe kann zukünftig auch in Veränderungen der Bereiche Verkehr und Wärme liegen. So würde der Wechsel von Verbrennungsmotoren hin zu Elektromotoren zu einer deutlichen Stromnachfrageerhöhung führen. Auch im Wärmesektor wäre ein forcierter Ausbau der Nutzung von Wärmepumpen mit weiterem Strombedarf verbunden. Steemers führt an, dass eine extrem kompakte Bauweise Wärmeverluste reduzieren kann, es aber zu einer starken Erhöhung mechanischer Ventilation als auch künstlicher Beleuchtung kommt (vgl. [154], Steemers). Demnach ist also in diesem Formszenario ein erhöhter Elektrizitätsbedarf zu erwarten. Lariviere konnte in ihren Forschungen 85% der urbanen Elektrizitätsnachfrage mittels eines linearen Modells erklären (vgl. [103], Larivière u. Lafrance). Das Modell beinhaltet 6 Prädiktorvariablen<sup>12</sup>. Eine der Variablen ist die urbane Dichte (gemessen als Bevölkerungsdichte). Als Ergebnis konstatiert Lariviere, dass die urbane Dichte nicht der Haupteinflussfaktor für Energienachfragen ist. Sie hält Faktoren wie Lebensstandard, Wertesystem, geographische und wirtschaftliche Situation für ebenso wichtig. In diesem Zusammenhang wird durch die Autorin ganz explizit auf die Schwierigkeit der Vergleichbarkeit urbaner Räume hingewiesen.

## 2.4 Urbane Form - Verkehrssektor

Der Verkehrssektor ist ein bedeutender sowie der offensichtlichste Bereich bei der Betrachtung des Zusammenhangs von Energie und urbaner Form. Die Bedeutung des Verkehrssektors mitsamt den Herausforderungen, Problemen und Zielen für Europas urbane Räume ist dabei mitunter im *“Grünbuch-hin zu einer neuen Mobilität in der Stadt“* und

---

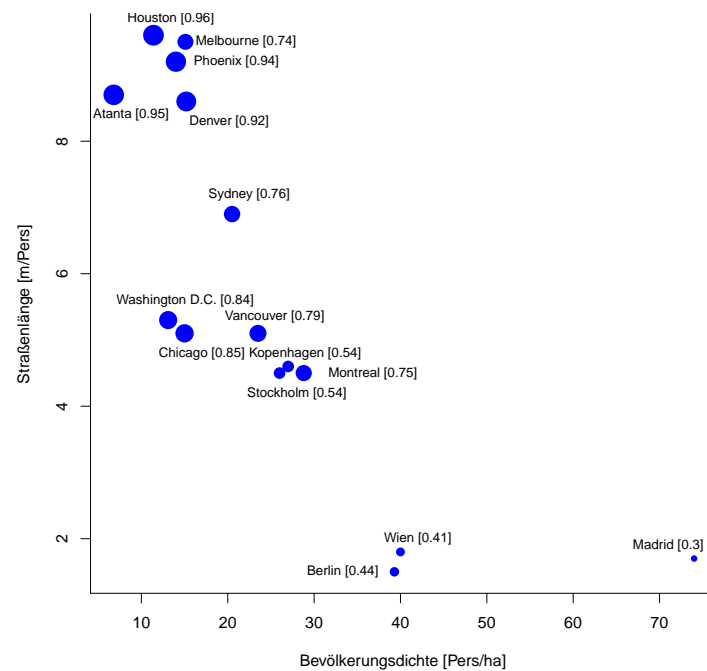
<sup>11</sup>Die Stromverbrauchsentwicklung im Haushaltssektor wurde auf Länderebene durch das Statistische Amt der Europäischen Union veröffentlicht. Länderstatistik Stromverbrauch privater Haushalte in Europa: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main\\_tables](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables)

<sup>12</sup>Die Variablen betreffen das Durchschnittsalter der Bevölkerung, die jährliche Anzahl von Tagen unter 18 Grad, die urbane Dichte, der Anteil der Wohnhäuser, die mit Strom heizen, den standardisierten Wohlstand des Landes pro Einwohner sowie die Freizeitausgaben pro Einwohner.

im “*Aktionsplan urbane Mobilität*“ beschrieben (vgl. [95], Kommission der europäischen Gemeinschaft bzw. [96], Kommission der europäischen Gemeinschaft). Der Energiebedarf im Mobilitätsbereich wird durch die Landnutzung wie auch durch das vorhandene Verkehrssystem beeinflusst. Erreichbarkeit, Wegezeiten, Wegedistanzen oder auch Autoabhängigkeit sind hierbei wichtige Schlagworte.

Die nachfolgende Abbildung 2.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der urbanen Form, dargestellt durch die Bevölkerungsdichte, und deren Auswirkungen auf den Verkehrssektor. Die Größe der Punkte verdeutlicht den Anteil des motorisierten Individualverkehrs für die verschiedenen Städte. Die genauen Werte sind in Klammern aufgeführt.

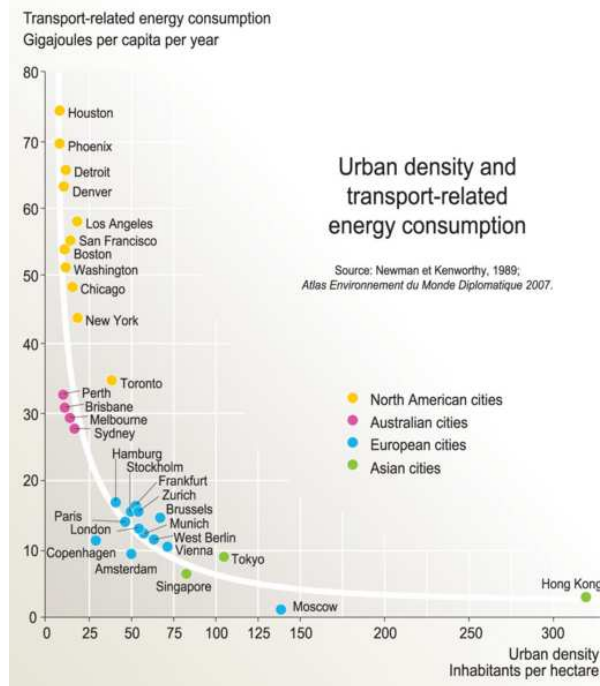
**Abbildung 2.4:** Anteil des motorisierten Individualverkehrs für verschiedene Städte



Quelle: nach Daten der Weltbank (vgl. [160], The World Bank)

Bei geringer Besiedlungsdichte müssen größere Distanzen überbrückt werden, um den Bedürfnissen der Menschen gerecht zu werden. Im Gegensatz dazu können aber auch kompakte Strukturen zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen führen, wenn innerstädtische Erholungsräume fehlen und somit das Umland aufgesucht wird oder auf Grund von Zeitersparnissen und geringeren Transportkosten zusätzliche Fahrten durchgeführt werden. Fulford beschreibt den Zusammenhang zwischen Siedlungsgröße, zurückgelegten

Kilometern und Transportmittel (vgl. [61],Fulford). Besonders kleine Siedlungen (kleiner 25000 EW) weisen eine deutlich größere Personenkilometerzahl auf, die dann auch zu einem Großteil mit dem Auto zurückgelegt wird (vgl. [61],Fulford). Newman und Kenworthy fanden in ihrer viel zitierten Arbeit (vgl. [119],Newman u. Kenworthy) einen starken statistischen Zusammenhang zwischen der Siedlungsdichte (gemessen als Bevölkerungsdichte) und der Pro-Kopf-Treibstoffnachfrage (vgl. Abb. 2.5). Der von Newman und Kenworthy konstatierte Zusammenhang wird in der Literatur vielfach kritisiert. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass amerikanische und australische Städte eine ähnliche Bevölkerungsdichte aufweisen, obwohl die Treibstoffnachfrage verschieden ist. Die unterschiedliche Treibstoffnachfrage lässt sich in diesem Zusammenhang vermutlich eher durch zugrunde liegende Treibstoffpreise erklären (vgl. [140],Salomon u. a.). Minaldi kam basierend auf Newman und Kenworthys Daten sogar zu dem Ergebnis, dass es keine Korrelation zwischen Energienachfrage und Siedlungsdichte gibt (vgl. [113],Minaldi u. a.). Die meisten Studien sehen jedoch eine Beziehung zwischen verminderter Autonutzung und erhöhter Dichte (vgl. [87],Karathodorou u. a.). So folgern Muniz und Galindo aus ihren Forschungen zu Pendlern in Barcelona, dass Dichte vor allem einen Einfluss auf den Anteil der Wege hat, die mit dem Auto zurückgelegt werden (vgl. [117],Muniz u. Galindo). Die Autoren verweisen darauf, dass die urbane Dichte eine größere Kapazität besitzt, die Variabilität des ökologischen Fußabdruckes von Siedlungen zu erfassen als soziale Faktoren.

**Abbildung 2.5:** Urbane Dichte und Energieverbrauch im Verkehrssektor

Quelle: [165], United Nations Environment Programme

Die Entwicklung der Personenkilometerzahl für die einzelnen Europäischen Länder, als auch generell die Transportentwicklung wird jährlich von der Europäischen Kommission veröffentlicht. In der aktuellen Veröffentlichung wird z.B. ein Zuwachs bei der Personenkilometerzahl für die EU-27 zwischen 1995 und 2005 von über 17% angegeben (vgl. [51], European Commission). Andererseits betragen 50% der Autofahrten weniger als 5km und 30% sogar weniger als 3km. Der öffentliche Transport macht weniger als 10% der Fahrten aus ([50], European Commission). Dies verdeutlicht die Potentiale urbaner Verkehrsplanung. Die Entwicklungen zeigen hierbei deutlich, dass dieser Sektor im Fokus von Nachhaltigkeitsanalysen stehen muss.

Neben verkehrsvermeidenden Strukturen durch intelligente Planung gibt es ein großes Energieeinsparpotential durch Technologiewechsel. Poudenx und Merida untersuchten für eine kanadische Region die Auswirkungen einer potentiellen totalen Umstellung des privaten PKW Fahrzeugbestandes auf erneuerbare Energien (vgl. [127], Poudenx u. Merida). Vierzig bis sechzig Prozent der erneuerbaren Ressourcen der Provinz British Columbia wären nötig, um in dieser Region die Fahrzeugflotte umzustellen. Die Autoren erwähnen weiter, dass die Umstellung auf die effizientesten Verkehrsmittel (in diesem

Fall Trolleybus und Hängbahn) eine Umstellung auf erneuerbare Energien begünstigen würde, auf Grund von verringertem Treibstoffbedarf. Hier schließt sich der Kreis zur urbanen Form, da in dichteren Besiedlungen der öffentliche Personentransport wirtschaftlicher betrieben werden kann.

Energieplanung ist zumeist kein Teil der Verkehrsplanung. Die traditionelle 4-Stufen Methodik zur Verkehrsplanung implementiert den Aspekt Energie nicht (vgl. [142], Saunders u. a.). Aufgrund dieses Mangels entwickelte die Autorengruppe um Saunders ein Softwaretool um in diesem Bereich Verbesserungen in der Planung zu erreichen.

Nach Wegener gibt es eine wachsende Übereinstimmung, dass einfache Erklärungsmuster über den Zusammenhang von Siedlungsstruktur und Verkehrsaufwand nicht ausreichen. Optimale Strukturen sind nicht bekannt (vgl. [172], Wegener). Wegener zitiert Schmitz (1991). *“Aus der Tatsache, dass die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen im Bereich der Steuerung der Siedlungs- und Raumentwicklung nur schwer quantifizierbar ist - wobei in bestimmten Fällen nicht einmal die Wirkungsrichtung benannt werden kann - muß letztlich der Schluss gezogen werden, dass eine unter Verkehrsgesichtspunkten 'ideale' Siedlungs und Raumstruktur nicht bekannt ist. Konzepte wie kleinräumige Nutzungsmischung, Stadtinnenentwicklung durch urbane Verdichtung, dezentrale Konzentration und Bildung von Entwicklungsachsen in der Regionalentwicklung sowie die Schaffung ausgeglichener Funktionsräume besitzen noch weitgehend den Charakter von Schlagwörtern. Sie bedürfen erstens einer stärkeren inhaltlichen Konzentrierung und zweitens eines Wirksamkeitsnachweises“*([172], Wegener, S.15).

In diesem Kapitel wurde der Zusammenhang von urbaner Form und Energienachfrage in den verschiedenen Sektoren betrachtet. Die urbane Form beeinflusst dabei die Möglichkeiten der Energieerzeugung als auch die Menge der nachgefragten Energie. In den nächsten Abschnitten geht es um die Erfassung urbaner Formen, wobei Europa als Untersuchungsgebiet dient.

# 3 Urbane Formenanalyse

## europäischer Siedlungen

*“It is the pervading law of all things organic and inorganic, of all things physical and metaphysical, of all things human and all things super-human, of all true manifestations of the head, of the heart, of the soul, that the life is recognizable in its expressions, that form ever follows functions. This is the law.”*(vgl. [156], Sullivan, S.408).

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, hat die urbane Form einen Einfluss auf den Energiesektor (Wärme, Kühlung, Elektrizität, Verkehr). In diesem Kapitel werden daher urbane Formen als Grundlage für weitere Untersuchungen erfasst und ausgewertet. Von den erfassten Siedlungen werden Koordinaten, Fläche, Umfang und abgeleitete Strukturmerkmale, wie die fraktale Dimension, bestimmt. Die Möglichkeiten der Erfassung von Formen und Strukturen unterliegen schnelllebigen Veränderungen (so werden beispielsweise durch das Unternehmen google immer mehr Städte in 3D erfasst und auch Laserscanning Daten sind vermehrt verfügbar). Da im Rahmen dieser Arbeit die Siedlungen in Europa möglichst vollständig erfasst werden sollten, können 3D und Laserscanning Daten nicht genutzt werden. Sie bleiben derzeit Einzelfallanalysen überlassen. Die Datengrundlage dieses Kapitels bilden daher frei verfügbare Landnutzungsdaten, diese werden zunächst beschrieben. Da die Untersuchung der urbanen Formen anhand von Binärbildern erfolgt, werden in einem theoretischen Abschnitt binäre Bildverarbeitung (morphologische Operatoren) und Maße zur Beschreibung von Formen erläutert. Im Methodikteil wird das Vorgehen für die Formanalyse dargestellt, wobei ein eigenes, für die Untersuchung herangezogenes, Analysewerkzeug beschrieben wird. Am Ende dieses Kapitels werden schließlich die Ergebnisse der europäischen Siedlungsformenanalyse präsentiert.

### 3.1 Datengrundlage und Aufbereitung

Die praktische Untersuchung urbaner Formen kann auf unterschiedlichen Datenquellen beruhen. Es können Kartensammlungen, Katasterdaten aber auch Satelliten- und Luftbildaufnahmen verwendet werden. Zusätzlich können abgeleitete Daten (z.B. interpretierte Daten aus Luftbildaufnahmen) herangezogen werden.

Für die Untersuchung der europäischen Siedlungsformen in dieser Arbeit wird sich auf den 2D Bereich beschränkt. Der Grund hierfür besteht darin, dass für den Untersuchungsraum Europa keine flächendeckenden 3D Siedlungsstrukturdaten verfügbar sind. Die Erhebung von 3D-Daten ist in der Regel sehr zeitaufwendig und kostenintensiv. Bei einer Beschränkung auf ausgewählte europäische Städte<sup>13</sup> liefert Schwarz eine Klasseneinteilung der Städte auf Grund urbaner Formparameter (vgl. [146], Schwarz). Die Datengrundlage der vorliegenden Arbeit bilden europäische Landnutzungsdaten des CORINE Land Cover Projektes (Coordinated Information on the European Environment - CLC). Urbane Form wird in diesem Zusammenhang nur durch Siedlungslandnutzungsklassen beschrieben.

Abbildung 3.1: CORINE-Landnutzungsdaten



Quelle:European Environmental Agency  
(<http://www.eea.europa.eu/themes/landuse/clc-download> - Screenshot)

<sup>13</sup>Die in dieser Untersuchung analysierten Städte sind Teilnehmer des Urban Audit. Datengrundlage der Veröffentlichung sind administrative Grenzen und CORINE Daten.



Die Landnutzungsdaten können durch die European Environmental Agency (EEA) oder auch durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) bezogen werden. Die EEA stellt Raster- und Vektordaten für die Jahre 1990, 2000 und 2006 zum kostenlosen Download bereit. Abbildung 3.1 zeigt einen Screenshot des CORINE Downloadbereiches der Internetseiten der EEA. Hierbei sind Quadrate (100km\*100km) zu erkennen, die als ESRI Shapedateien zur Verfügung stehen. Der CORINE Datensatz 2006 beinhaltet Landnutzungsinformationen für die in Tabelle 3.1 aufgeführten Länder<sup>14</sup>.

**Tabelle 3.1:** CORINE2006 - erfasste Staaten

Staaten		
Albanien	Kroatien	Portugal
Belgien	Lettland	Rumänien
Bosien und Herzegowina	Lichtenstein	Serbien
Bulgarien	Litauen	Slowakei
Dänemark	Luxemburg	Slowenien
Deutschland	Malta	Spanien
Estland	Montenegro	Schweden
Finnland	Mazedonien	Tschechien
Frankreich	Niederlande	Türkei
Irland	Norwegen	Ungarn
Island	Österreich	Zypern
Italien	Polen	

Die CORINE Landnutzungsdaten (CLC2000) sind in 3 Ebenen Untergliedert. Insgesamt werden bei der feinsten Aufgliederung der CLC Daten (Ebene 3) 44 Landnutzungskategorien unterschieden. In Tabelle 3.2 ist die hierarchische Struktur der Landnutzungsklassifikation angegeben (in Abbildung A1 Anhang S. 162 ist die vollständige Landnutzungsklassifikation aufgeführt). Für die folgenden Untersuchungen werden nur die Klassen Continuous<sup>15</sup> und Discontinuous<sup>16</sup> urban fabric betrachtet. Die Landnutzungskategorie Continuous urban fabric ist dadurch gekennzeichnet, dass mehr als 80% der Gesamtfläche von Straßen und Gebäuden (künstlich geschaffene Bodenbedeckung) eingenommen wird. Vegetation und freier Boden kommen nur in sehr geringem Umfang vor. Im Gegensatz dazu ist die Landnutzungskategorie Discontinuous urban fabric durch einen höheren Vegetationsanteil gekennzeichnet (Straßen, Häuser und andere menschlich

---

<sup>14</sup>Es sind nur die Länder aufgeführt, für die derzeit (CLC2006V13) Daten verfügbar sind. Die Landnutzungsdaten von der Schweiz, Griechenland und Großbritannien sind derzeit noch nicht verfügbar (Stand Juni 2011). Darüber hinaus erstreckt sich das erfasste Gebiet auch über eingebettete Kleinststaaten (San Marino, Vatikan).

<sup>15</sup>Continuous Urban Fabric: Flächen mit durchgängig städtischer Prägung

<sup>16</sup>Discontinuous Urban Fabric: Flächen mit nicht durchgängig städtischer Prägung



geprägte Flächen nehmen einen Anteil von 30% bis 80% der Gesamtfläche ein). Diese Kategorie entspricht demnach Einzelhaussiedlungen (Gartenflächen) als auch aufgelockerter Blockbebauung.

**Tabelle 3.2:** CLC2000-Landnutzung

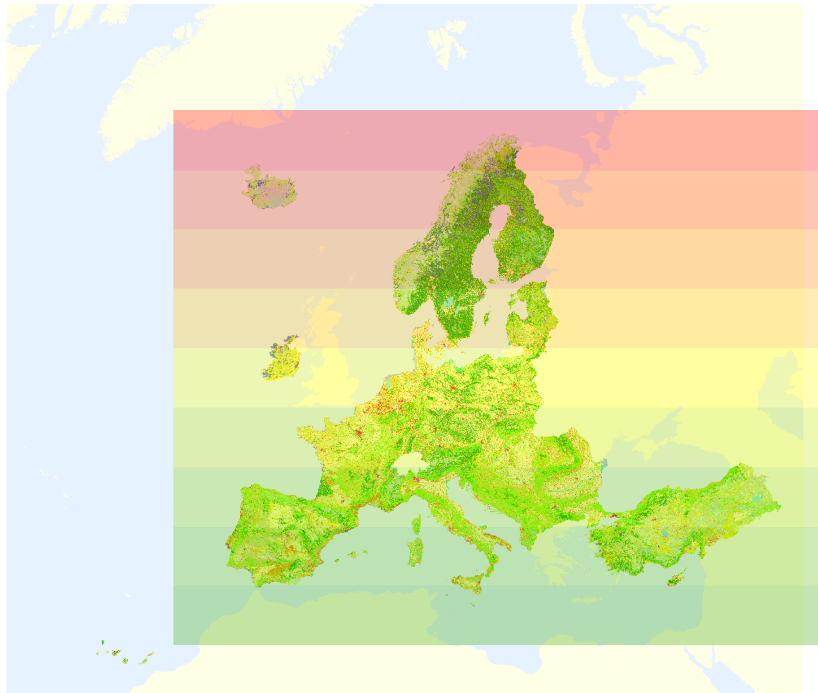
Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	RGB
Artificial surfaces	Urban fabric	Continous urban fabric	230-000-077
Artificial surfaces	Urban fabric	Discontinuous urban fabric	255-000-000
Artificial surfaces	Industry, commercial, transport	...	
Artificial surfaces	...	...	
Agricultural areas	...	...	
...	...	...	

Für die Anlayse wurden Geotiff LZW komprimierte Rasterdaten verwendet. Da für die Formanalyse als Analysewerkzeug MATLAB (Matrix Laboratory) genutzt wurde, mussten diese Daten aufbereitet werden, da die Art der Komprimierung durch MATLAB nicht unterstützt wird. Des Weiteren wurde eine Datenaufbereitung aus Speicherplatzgründen nötig. Die Größe der zu speichernden Matrizen in MATLAB ist limitiert durch die größten zusammenhängenden Speicherblöcke des Hauptspeichers (Contiguous Free Blocks). Daher musste das Untersuchungsgebiet partitioniert<sup>17</sup> werden. Des Weiteren ist eine Begrenzung der Matrixgrößen nötig, da bereitgestellte Funktionen wie imread nicht beliebig große Matrizen verarbeiten können. Abbildung 3.2 zeigt die Partitionierung der Landnutzungsflächen dargestellt als Streifen (Streifenbreite 500km). In MATLAB selbst mussten die Streifen auf Grund der Speicherlimitierung nochmals geteilt werden. Eine weitere Notwendigkeit für die Partitionierung bestand in der Tatsache, dass das dekomprimierte tif-Bild von ganz Europa mit 3 Bändern 10.86 GB (67000Pixel\*58000Pixel, Zellgröße:100, Pixeltiefe:8) Speicherplatz benötigen würde, was durch die tif-Beschränkung auf 4GB nicht zu realisieren ist.

---

<sup>17</sup>Partition: Zerlegung einer Menge in nicht leere disjunkte Teilmengen.

**Abbildung 3.2:** Partitionierung der Landnutzungsflächen



#### Genauigkeit und Datengrundlage der CORINE Daten

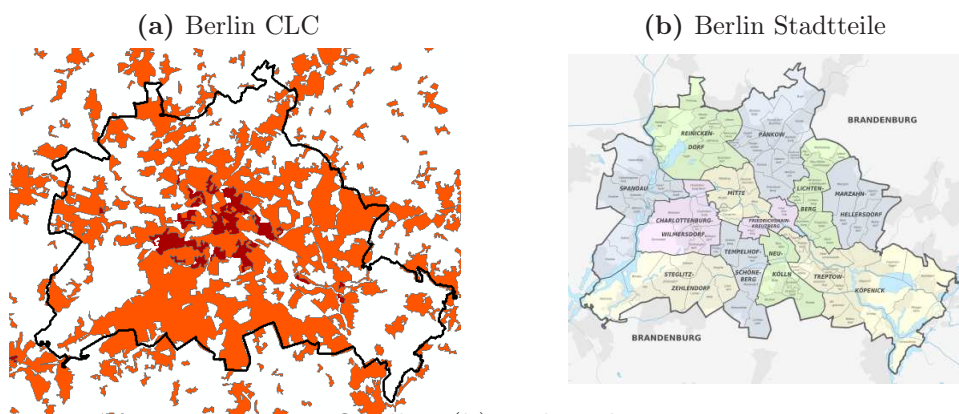
Die Daten für CORINE wurden grundsätzlich nach einem abgestimmten Verfahren im Maßstab 1:100000 erhoben, so dass eine Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Allerdings weichen z.B. der Aufnahmezeitraum als auch die geometrische Genauigkeit der Datensätze von 1990 und 2000 voneinander ab (vgl. [110], Meinel u. a.). Weiterhin basiert die Interpretation der aufgenommenen Satellitendaten zum Teil auf visuellen Eindrücken (semiautomatische Lösung). So stellt die Interpretation unter zu Hilfenahme von Folien, weiterer Karten oder menschlicher Bildschirmdigitalisierung eine unsystematische Fehlerquelle dar. Die Fehlerquellen bei der Satellitenbildinterpretation lassen sich nach Bossard et al. (vgl. [23], Bossard u. a.) vier Kategorien zuordnen:

- Überlappung von spektralen Bereichen
- Pixel beinhalten mehrere Landnutzungskategorien
- Aufnahme und Geometrie
- Konzeptionelle Fehler - z.B. Variabilität in Klassen geht verloren

Ungenauigkeiten in der Landnutzungsklassifikation werden durch Generalisierungen hervorgerufen. So beträgt die Mindestgröße für eine in CORINE erfasste Flächennutzung 25 ha. Der erfasste Flächenzuwachs und die Flächenabnahme innerhalb einer Landnutzungskategorie können allerdings Werte kleiner als 25 ha annehmen. Weiterhin werden adjazente Flächen zusammengefasst, wenn sie jeweils kleiner als 25 ha sind. Die Gesamtfläche muss hierbei wieder die Mindestgröße von 25 ha erreichen. Gehört beispielsweise eine Fläche in die Kategorie der Continuous und die benachbarte Fläche zur Klasse der Discontinuous urban fabric, so wird die zusammengefasste Fläche als Discontinuous ausgewiesen. Um eine Gesamtfläche von mehr als 25 ha zu erzeugen, werden darüber hinaus kleine Siedlungen (<25 ha), die in die Discontinuous Klasse gehören, zusammengefasst, wenn der Abstand zwischen den Siedlungen weniger als 300 m beträgt (vgl. [23], Bossard u. a.).

Landnutzungsdaten (Siedlungen) können erheblich von administrativen Grenzen abweichen. Es gibt keine bijektive Beziehung zwischen einer bestimmten Siedlungslandnutzung und einer Stadt. So können mehrere Siedlungen zu einer Stadt gehören als auch eine Siedlung zu mehreren Städten. Daraus folgt, dass die Verknüpfung der Siedlungen mit städtestatistischen Daten nicht in einfacher Weise erfolgen kann. Dies ist in der folgenden Abbildung 3.3 veranschaulicht.

**Abbildung 3.3:** CORINE-Siedlungsdaten am Beispiel von Berlin



Quelle : (b) Wikipedia

Berlin hat eine Fläche von ca.  $890 \text{ km}^2$  (davon sind ca.  $486,65 \text{ km}^2$  Siedlungsfläche (nach Angaben des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg)). Die größte zusammenhängende Siedlung, welche Teile von Berlin aber auch Bereiche außerhalb der administrativen Grenzen umfasst, beträgt nach den CLC Rasterdaten  $441,79 \text{ km}^2$ . Die Verschneidung

von CLC Siedlungsflächen (hier jedoch Vektordaten) mit der Fläche Berlins ergibt eine Siedlungsfläche von ca.  $458,83 \text{ km}^2$ . Dies bedeutet, dass in diesem Fall ca. 94% der Siedlungsflächen erfasst werden. Hinzu kommt, dass die offizielle Siedlungsflächenangabe aktueller ist als die der CLC Daten (d.h., dass die Wiedergabe der Siedlungen gegebenenfalls noch besser ist).

Im Verlauf der vorherigen Abschnitte wurde die verwendete Datengrundlage (CLC Daten) und ihre Genauigkeit dargestellt. Der große und entscheidende Vorteil dieser Daten liegt in der Homogenisierung und der großen Flächenabdeckung. Als Nachteil kann angesehen werden, dass Daten nur zu wenigen Zeitpunkten zu Verfügung stehen und das für den hier betrachteten Bereich der Siedlungen nur eine sehr beschränkte Klassenunterscheidung existiert. Daher sollen zur Vollständigkeit im nächsten Abschnitt zwei weitere Landnutzungsdatenquellen (*MOLAND* (Monitoring Land Use/Cover Dynamics) und *Urban Atlas* als Teil von GMES (Global Monitoring for Environmental Security)), die diese Nachteile etwas aufheben, erwähnt werden. Die Datenquellen wurden aufgrund der geringen Flächenabdeckung jedoch nicht weiter in die Analysen dieser Arbeit einbezogen.

Als erstes sei hier das Projekt MOLAND (früher MURBUNDY) aufgeführt. MOLAND<sup>18</sup> wird bearbeitet durch das Institute for Environment and Sustainability (IES). MOLAND integriert verhältnismäßig wenige Untersuchungsgebiete (ca. 30), dafür gibt es jedoch Landnutzungsdaten die bis zu 50 Jahre zurückreichen. Nähere Angaben zu MOLAND sind bei Barredo et al. beschrieben (vgl. [9], Barredo u. a.). GMES<sup>19</sup> ist eine der drei Hauptinitiativen betreffend Umweltinformationen in und über Europa. Die anderen Initiativen sind das Shared Environmental Information System (SEIS)<sup>20</sup> und die Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)<sup>21</sup>. GMES ist eine gemeinsame Initiative der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumbehörde (ESA). Ziel ist es, die europäischen Territorien zu überwachen, um politische Entscheidungsprozesse mittels raumbezogener Informationen zu unterstützen. Hierbei sind die Bereiche Umweltschutz, aber auch Ressourcen-, Agrar- und Sicherheitspolitik zu nennen. Im Rahmen von GMES werden Erdbeobachtungssatelliten (z.B. Sentinel-Satelliten ab 2012) als auch Daten von Bodenstationen, luftgestützten Beobachtungssy-

---

<sup>18</sup>Mehr Informationen zu MOLAND sind zu finden unter: <http://moland.jrc.ec.europa.eu>

<sup>19</sup>Ausführlichere Informationen zu GMES sind unter <http://www.gmes.info> zu finden.

<sup>20</sup>Diese Initiative der Europäischen Kommission hat das Ziel ein gemeinsames europäisches Umweltinformationssystem zu schaffen.

<sup>21</sup>INSPIRE hat das Ziel die europäische Geodateninfrastruktur durch interoperable Geobasisdaten zu harmonisieren und ist eine Initiative der europäischen Kommission

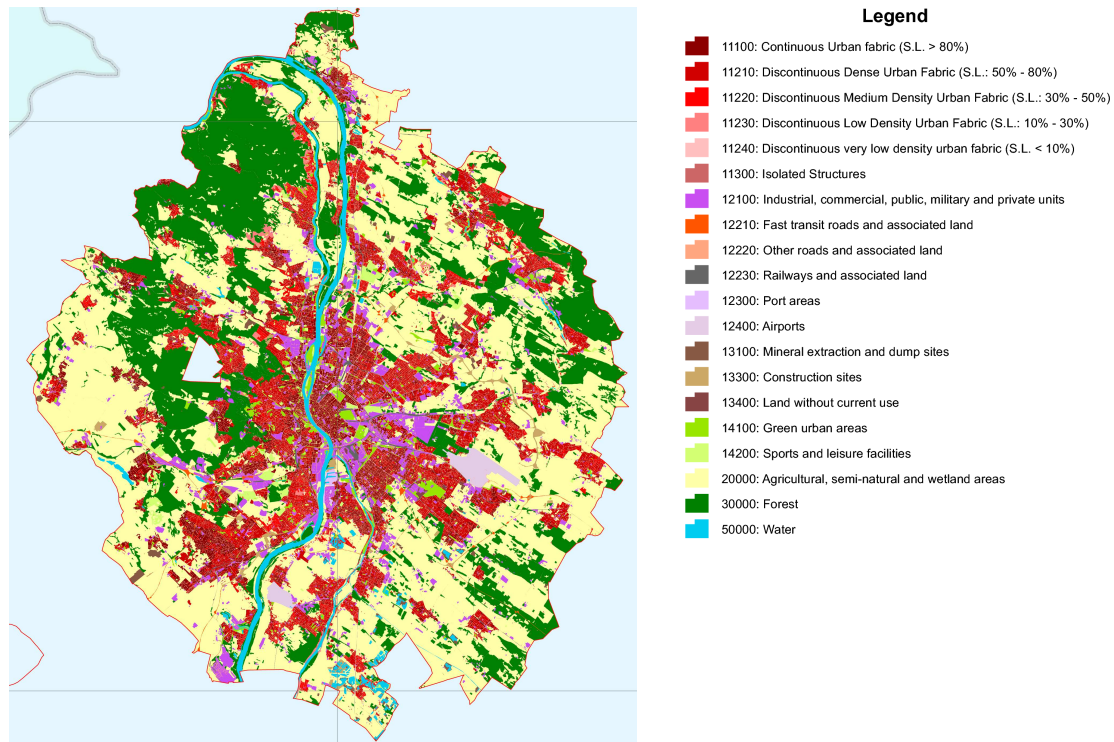
temen und Geoinformationsdiensten verwendet. Die zusammengefassten vereinheitlichten Daten dienen der europäischen Raumbeschreibung und werden vor allem von politischen Entscheidungsträgern genutzt (Endnutzer können jedoch auch Unternehmen, die Forschung bzw. einzelne Bürger sein). Ein Teilbereich von GMES stellt geoland2 (Land Beobachtung) dar. Dieser beinhaltet wiederum den GMES Urban Atlas<sup>22</sup>. Vergleichbare Landnutzungsdaten von größeren urbanen Gebieten mit mehr als 100000 Einwohnern (definiert nach Urban Audit) sind im Internet verfügbar (Shape-, pdf- und Worddateien)<sup>23</sup>. Die Daten werden fortlaufend ergänzt. Die GMES Urban Audit Daten stellen insofern eine Verbesserung zu den bereitgestellten CORINE Daten dar, als dass die Gebietsauflösung feiner ist (so sind z.B. auch innerstädtische Grünflächen ausgewiesen - die minimale Flächenauflösung beträgt 0.25ha für urbane Klassen). Daraus ergibt sich, dass eine zukünftige Ergänzung der europäischen Siedlungsauswertung durch GMES Urban Atlas Daten sinnvoll ist. Jedoch sind, wie angesprochen, European Urban Atlas Daten derzeit nicht flächendeckend verfügbar. Es werden 20 Klassen unterschieden, von denen 16 direkt Urbanität betreffen (die anderen Klassen stellen z.B. Wald oder Wassergebiete dar). Insgesamt sind derzeit (Stand:04.02.2011) Daten von 249 Siedlungen vorhanden. Die nachfolgende Abbildung 3.4 stellt die verfügbaren GMES Daten am Beispiel der Stadt Budapest dar.

---

<sup>22</sup>Urban Atlas GIS Datenbezug: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>

<sup>23</sup>Eine Übersicht über Gebiete, von denen Daten verfügbar sind, ist unter <http://dataservice.eea.europa.eu/map/UrbanAtlasBeta/> zu finden.

**Abbildung 3.4:** Urban Atlas Landnutzungsdaten am Beispiel von Budapest



Quelle : EEA Urban Atlas

In diesem Abschnitt wurde die Datengrundlage für die Analyse europäischer Siedlungen beschrieben. In den folgenden Abschnitten wird das methodische Vorgehen, die Formanalyse und abschließend die Auswertung für die europäischen Siedlungen vorgestellt.

## 3.2 Methodik

Nach dem Partitionieren der Daten sowie der Bereitstellung des Raumbezugs durch Esri-Worldfiles<sup>24</sup> werden die erzeugten Rasterdaten (tif-Dateien) in MATLAB eingelesen. Der nächste Schritt ist die Extraktion der für diese Untersuchung relevanten Daten. Da nur die Siedlungsdaten von Interesse sind, wurden die ursprünglichen RGB Daten in Binärbilder<sup>25</sup> umgewandelt. Daraufaufgehend wurden Pixel zu Objekten, den betrachteten Siedlungen, zusammengefasst. Diese Zusammenfassung ist nicht eindeutig und wird

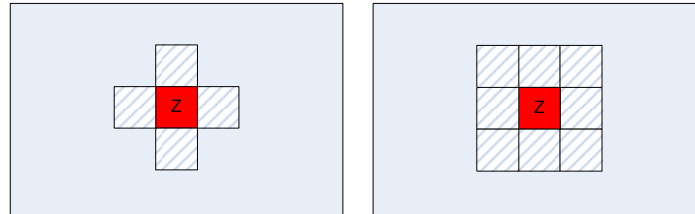
<sup>24</sup>Dateiendung: tfw (Informationen über den Raumbezug wurden mittels eines Skripts aus der geotiff Datei extrahiert.)

<sup>25</sup>Der 3 dimensionale Farbraum wurde verworfen, so dass resultierende schwarz-weiß Bilder durch jeweils eine Matrix beschrieben werden können.



durch eine festgelegte Nachbarschaft bestimmt. Die Wahl der Nachbarschaft ist von besonderer Bedeutung, da durch die Art der Zusammenfassung die Ergebnisse beeinflusst werden. Zwei der bekanntesten Nachbarschaften sind in nachfolgender Abbildung (vgl. Abb. 3.5) dargestellt.

**Abbildung 3.5:** Von-Neumann und Moore-Nachbarschaften



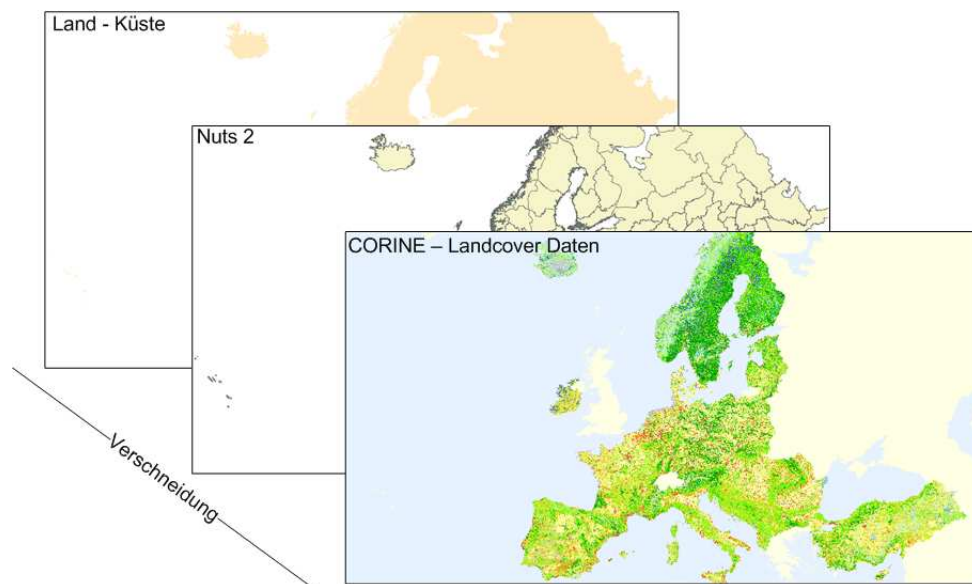
Es handelt sich hierbei um die von Neumann Nachbarschaft (4er Nachbarschaft) und die Moore Nachbarschaft (8er Nachbarschaft). Für die Siedlungsauswertung wurde als Nachbarschaft die Moore Nachbarschaft festgelegt. Diese führt im Vergleich zur von Neumann Nachbarschaft zu weniger Siedlungen, hat jedoch den Nachteil, dass sehr lange Siedlungsketten entstehen können.

Ein Labeling Algorithmus für die Pixelzusammenfassung wird von MATLAB bereitgestellt. Nach der Firma Mathworks wird dabei ein von Haralick und Shapiro beschriebener Algorithmus verwendet, der die betrachteten Siedlungen bzw. Siedlungsverbünde bestimmt (vgl. [71], Haralick u. Shapiro).

Da Europa in verschiedene Teilbilder aufgeteilt wurde (vgl. Abb. 3.2), besteht die Möglichkeit, dass Landnutzungen über Bildgrenzen hinweg bestehen. Um alle Siedlungen vollständig zu erfassen, wurde folgendermaßen vorgegangen: Zuerst werden nur die Siedlungen betrachtet, die nicht mit dem Rand des Bildes in Verbindung stehen. Es werden also als Erstes die Randpixelpositionen in einem Vektor gespeichert. Im nächsten Schritt werden alle Pixelpositionen, die zu einer Siedlung gehören in einem Vektor zwischengespeichert. Damit können nun die beiden Mengen (Vektoreinträge) verschnitten werden. Nur diejenigen Siedlungen werden weiter untersucht, die als Schnittmenge die leere Menge erzeugen. Alle anderen Siedlungen werden vorerst nicht betrachtet. Dieses Vorgehen wird für alle Siedlungen in den verschiedenen 500 km Siedlungsstreifen wiederholt. Um die bildübergreifenden Siedlungen zu berücksichtigen, wurde ein beidseitiger 30 km Streifen um die Bildgrenzen (Streifen Nord-Süd Grenze) gelegt. Dies ist vergleichbar mit den Buffer Zones, deren Bestimmung eine Grundfunktionalität in GIS-Software

ist. Jetzt werden nur die Siedlungen betrachtet, die mindestens einen Pixel mit mindestens einer der beiden mittleren Matrixzeilen des 60 km Streifen Bildes gemeinsam haben (Verschneidung). Schließlich wurde, wie angedeutet, jeder 500 km Streifen nochmals senkrecht in der Mitte geteilt, um Speicherprobleme zu vermeiden. Es müssen also im letzten Schritt noch diejenigen Siedlungen betrachtet werden, die den senkrechten Schnitt berühren, gleichzeitig aber nicht die waagerechten Schnittgrenzen betreffen. Anderenfalls würden Siedlungen doppelt analysiert werden. Die Formanalyse erfolgt nun anhand der jetzt vollständig vorliegenden Siedlungen, die in Binärbildern gespeichert sind.

**Abbildung 3.6:** Datengewinnung durch Verschneidung



Die Binärdaten zusammen mit dem Esri-Wordlfile enthalten Information darüber, wo sich Siedlungen befinden und wie die geometrische Form dieser ausgestaltet ist. Um weitergehende Informationen über die Siedlungen zu erhalten, sind Verschneidungen notwendig (vgl. Abb. 3.6)<sup>26</sup>. So wurden die Siedlungen mit den europäischen Landesgrenzen verschnitten, um später Aussagen über Gemeinsamkeiten (bzw. Verschiedenartigkeit) der Siedlungsausprägung in einzelnen Ländern treffen zu können.

Im nächsten Abschnitt wird nun die Formbestimmung auf Grundlage von Binärbildern erläutert.

---

<sup>26</sup>Die Verschneidung erfolgt mit weiteren tif Rasterbildern. Die Informationen sind dabei durch die Farbwerte kodiert.



### 3.3 Binärbildanalyse (Formbestimmung mittels morphologischer Operatoren)

Wie bereits dargestellt, ist für diese Arbeit nur die Beschreibung von Siedlungen von Interesse. Weitere Landnutzungsklassen werden nicht betrachtet. Demnach gibt es nur eine binäre Unterscheidung hinsichtlich der Landnutzung (Siedlung oder nicht Siedlung). Die Grundlage der Formanalyse sind somit Binärbilder. Binärbilder können mittels morphologischer Operatoren ausgewertet werden. Dies wird im Weiteren beschrieben, bevor Ergebnisse der praktischen Untersuchung vorgestellt werden.

Der Begriff Morphologie, der dem Griechischen entstammt, wurde aus der Biologie bzw. den Geowissenschaften entlehnt und auf die Bildverarbeitung übertragen. Morphologie als Lehre von der Form bzw. der Gestalt wird auf spezielle Gebiete angewendet. In der Biologie ist die Morphologie das Teilgebiet, dass die Beschreibung der Struktur und Form von Organismen zum Ziel hat. In den Geowissenschaften findet sich Morphologie in den Forschungsrichtungen Geomorphologie, Hydromorphologie, Kristallmorphologie aber auch Stadtmorphologie. In diesem Kapitel sollen nun Formen in Binärbildern untersucht werden. Durch die Anwendung mathematischer morphologischer Operatoren kann die Form von Objekten analysiert werden. Morphologische Operatoren können auf Binär- und Grauwertbilder angewendet werden und dienen der Randerkennung, der Merkmalsextraktion als auch der Veränderung des Kontrastes. Im Folgenden werden die grundlegenden Operatoren Dilatation und Erosion sowie aus diesen zusammengesetzte Operatoren beschrieben. Eine Abhandlung über binäre Bildverarbeitung mit den hier beschriebenen Operatoren ist unter anderem bei Jähne zu finden (vgl. [85], Jähne).

#### Dilatation

Im Falle der Dilatation werden Objekte ausgedehnt. Mit Hilfe einer Maske, auch Strukturelement genannt, wird das vorliegende Binärbild gefaltet. Die Maske, die die Dimension  $(2R + 1) \times (2R + 1)$  hat, bestimmt demnach wie die Objekte ausgedehnt werden. Die folgende Formel beschreibt die Definition der Dilatation. Da Binärbilder nur die Werte Null oder Eins besitzen, kann die Definition mittels boolescher Algebra erfolgen:

$$g'_{mn} = \bigvee_{m'=-R}^R \bigvee_{n'=-R}^R m_{m',n'} \wedge g_{m+m',n+n'}$$

Äquivalent kann die Dilatation auch folgendermaßen als Mengenoperation definiert werden:

$$(G \oplus M) = \{p : M_p \cap G \neq \emptyset\}$$

Darüber hinaus liefert die Dilatation das gleiche Ergebnis wie ein Maximum-Filter. Insofern kann die Dilatation auch dementsprechend beschrieben werden:

$$(G \oplus M)(x, y) = \max\{G(x + s, y + t) | (s, t) \in D_x\}$$

G ist hierbei das Binärbild und M die Maske ( $M(s, t) \in \{0, 1\}$ ). Mit Hilfe von s und t wird der Definitionsbereich der Maske durchlaufen. Ein Beispiel für die Dilatation ist durch die folgende Veranschaulichung gegeben. Hierbei ist die erste Matrix das Binärbild G und die zweite Matrix die Maske M.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

### Erosion

Diese Operation erodiert Objekte. Objekte schrumpfen demnach und Kleinstobjekte können ganz verschwinden. Mithilfe einer Maske wird wiederum die Art und Stärke der Erosion festgelegt. Die Definition der Erosion mittels boolescher Algebra lautet:

$$g'_{mn} = \bigwedge_{m'=-R}^R \bigwedge_{n'=-R}^R m_{m',n'} \wedge g_{m+m',n+n'}$$

Äquivalent kann die Erosion als Mengenoperation auch in folgender Weise definiert werden:

$$(G \ominus M) = \{p : M_p \subseteq G\}$$

Darüber hinaus liefert die Erosion das gleiche Ergebnis wie ein Minimum-Filter. So ist es auch möglich, die Erosion mit Hilfe der folgenden Gleichung zu beschreiben:

$$(G \ominus M)(x, y) = \min\{G(x + s, y + t) | (s, t) \in D_x\}$$

Die Wirkungsweise der Erosion wird durch das folgende Beispiel veranschaulicht. Dabei ist die erste Matrix wiederum das Binärbild G und die zweite Matrix die Maske M.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \ominus \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

### Zusammengesetzte Operatoren

Die zwei am häufigsten verwendeten Operatoren sind das Öffnen (Opening), beschrieben durch Gleichung (3.1) und das Schließen (Closing), dargestellt in Gleichung (3.2). Beim Öffnen wird auf eine Erosion eine Dilatation angewendet. Dies führt dazu, dass durch die Erosion hervorgerufene Kleinstobjekte verschwinden, jedoch durch die anschließend durchgeführte Dilatation die größeren Objekte nicht verkleinert werden. Beim Schließen wird zuerst eine Dilatation und anschließend eine Erosion durchgeführt. Dies führt zum schließen eventuell vorhandener kleiner Löcher unter Beibehaltung der Größe der Objekte. Die beiden Operationen sind folgendermaßen definiert:

$$G \circ M = (G \ominus M) \oplus M \tag{3.1}$$

$$G \bullet M = (G \oplus M) \ominus M \tag{3.2}$$

Ein Operator, der aus den Operatoren Erosion und Dilatation oder aus zwei Erosionen zusammengesetzt ist, kann zum Erkennen von spezifischen Objektformen eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich um den Hit-Miss-Operator (Gleichung (3.3)). Der Hit-Miss-Operator ist folgendermaßen definiert:

$$G \otimes (M_1, M_2) = (G \ominus M_1) \cap (\overline{G \ominus M_2}) = (G \ominus M_1) \cap (\overline{G \oplus M_2}) \text{ mit } M_1 \cap M_2 = \emptyset \quad (3.3)$$

Mittels der Maske  $M_1$  werden die Objekte bestimmt, die größer oder gleich der gesuchten Objektform sind. Die Maske  $M_2$  wird so festgelegt, dass sie der Negativform der gesuchten Objektform entspricht. Die Anwendung der Maske  $M_2$  auf das invertierte Originalbild ermittelt Objekte, die kleiner oder gleich den gesuchten Objekten sind. Der Schnitt über diese beiden angewendeten Erosionen liefert das gewünschte Ergebnis, also Objekte einer bestimmten Form. Im Folgenden ist zur Veranschaulichung der Masken  $M_1$  und  $M_2$  ein Beispiel angegeben, wenn Objekte mit einer horizontalen Anordnung von drei Pixeln gesucht werden sollen:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Die anschließend dargestellten Matrizen verdeutlichen die Wirkungsweise des Hit-Miss-Operators. Dabei ist das Originalbild durch die Matrix  $G$  gegeben:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } G \ominus M_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\overline{G} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \text{ und } \overline{G} \ominus M_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$(G \ominus M_1) \cap (\overline{G} \ominus M_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Mit den angesprochenen Operatoren können demnach beliebige Formen in binären Rastergrafiken detektiert werden. Dadurch können gleiche oder ähnliche Siedlungsformen in Europa bestimmt werden. Der nächste Abschnitt erläutert Parameter zur Bestimmung von Siedlungsformen.

### 3.4 Siedlungsparameter für urbane Formen

Bei Siedlungen kann die Form an sich, die Veränderung der Form im Laufe der Zeit als auch die räumlichen Beziehungen zwischen Siedlungen und oder weiteren Landnutzungsformen untersucht werden. In dieser Untersuchung wird eine statische Analyse der urbanen Formen der Siedlungen durchgeführt. Auf Veränderungen der Form im Laufe der Zeit und die räumlichen Beziehungen zwischen Siedlungen wird auf Grund Ihrer prinzipiellen Bedeutung kurz eingegangen. Nachfolgend werden die bei der Untersuchung der urbanen Form bestimmten Parameter sowie daraus abgeleitete Größen beschrieben. Formanalysen werden dabei durch das von Sullivan am Kapitelanfang dargelegte Zitat legitimiert (vgl. [156], Sullivan).

Zu Beginn der Formanalyse werden der Flächeninhalt und der Umfang einer jeden Siedlung bestimmt. Zur Bestimmung des Flächeninhalts wird die Anzahl der zu einer Siedlung gehörenden Pixel gezählt. Die Anzahl der Pixel ist, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, durch die gewählte Nachbarschaft festgelegt. Da ein Pixel für eine bestimmte Fläche in der Realität steht, kann die Pixelanzahl in eine gängige Maßeinheit für

den Flächeninhalt umgerechnet werden. Mit Hilfe der beschriebenen Erosionsoperation kann der Umfang berechnet werden ( $G \setminus (G \ominus M)$ ). Bei der Berechnung wurde jedoch auf den Erosionsoperator verzichtet. Der Umfang wurde direkt in Metern in Abhängigkeit der Lage zugehöriger Zellen berechnet. Aus den Parametern Umfang und Flächeninhalt werden Größen für die Kompaktheit einer Siedlung abgeleitet.

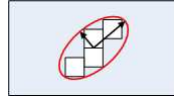
Die Kompaktheit von Siedlungen wird zumeist nur qualitativ beschrieben. Kompakte Siedlungen sind durch höhere Dichte (Bevölkerung, Gebäude) und gemischte Nutzung charakterisiert. Zumeist werden kompakte Städte als Lösung eines nachhaltigen Städtedesigns angesehen (vgl. [81], Jabareen). Jedoch gibt es auch Publikationen, die Kompaktheit kritisch sehen (vgl. [118], Neumann). So schlussfolgert Neumann in seinem Artikel, dass es weder notwendig noch hinreichend ist, die Ziele der idealisierten kompakten Stadt zu verfolgen. So stehen für ihn Prozesse im Vordergrund. Die interessanten Fragen thematisieren demnach die Nachhaltigkeit der Lebensweise der Bewohner, des Konsums, die Produktion von Gütern und Dienstleistungen. Strukturen und Formen werden als Ergebnis der sich ständig wandelnden Prozesse gesehen. Um den Grad der Kompaktheit quantitativ erfassen zu können, sind Indikatoren notwendig, wobei sich die vorliegende Arbeit nur auf geometrische Aspekte bezieht. Für die Messung der Kompaktheit von geometrischen Formen können verschiedene Indikatoren verwendet werden (vgl. [114], Montero u. Bribiesca und [2], Angel u. a.). Die Methoden zur Messung von Kompaktheit können dabei in Methoden gruppiert werden, die innere Distanzen messen, Methoden, die Vergleichsgeometrien heranziehen und Methoden die auf geometrische Pixeleigenschaften zurückgreifen. Nachfolgend werden die verwendeten Indikatoren vorgestellt.

Gewöhnlich wird unter Kompaktheit der folgende Quotient verstanden:  $\frac{\text{Umfang}^2}{\text{Flächeninhalt}}$ . Im zweidimensionalen Raum ist die kompakteste Form ein Kreis, wobei verschiedene Eigenschaften zu dieser Kompaktheit beitragen (vgl. [2], Angel u. a.). Durch die Quadrierung hat der Umfang allerdings ein zu starkes Gewicht, so dass in vielen Fällen weitere Indikatoren hinzugezogen werden müssen. Eine weitere Möglichkeit die Kompaktheit zu erfassen, ist es Siedlungen durch eine bestmöglich angepasste Ellipse zu beschreiben. Die Längen der Halbachsen ergeben dann ein Maß für die Kompaktheit. Je länglicher die Ellipse ist, desto weniger kompakt ist die Siedlung (vgl. Abb. 3.7). Lineare Siedlungen<sup>27</sup>, z.B. entlang von Straßen oder Flüssen können mit diesem Indikator erkannt werden.

---

<sup>27</sup>Im ländlichen Raum kann an Straßendörfer, Zeilendörfer etc. gedacht werden.

**Abbildung 3.7:** Ellipse als Kompaktheitsindikator



Dieser Indikator hat allerdings den Nachteil, dass bestimmte weniger kompakte Formen (z.B. sternförmige Objekte) als kompakt angesehen werden. Ein weiterer ausgewerteter Indikator ist der Quotient aus Siedlungs- und BoundingBox-Fläche. Dieser Indikator hat allerdings den Nachteil, dass z.B. eine quadratische Siedlungsfläche kompakter wäre als eine kreisförmige. Der dritte berechnete Indikator ist der ShapeIndex<sup>28</sup>. Er setzt den Kreis als kompakteste Form voraus und berechnet die Abweichung der betrachteten Siedlung zu einem Kreis mit gleichem Flächeninhalt.

$$ShapeIndex = \frac{Siedlungsumfang}{2\sqrt{\Pi * Siedlungsflaeche}} = \frac{Siedlungsumfang}{2\Pi r}$$

Die Unzulänglichkeiten verschiedener Form-Indikatoren werden von Tsai beschrieben (vgl. [163], Tsai). So identifiziert er als einen Nachteil, dass gleiche Indikatorwerte miteinander für verschiedene Situationen in der Realität stehen können. Bezogen auf den ShapeIndex verdeutlicht dies Abbildung 3.8.

**Abbildung 3.8:** Indikatorunzulänglichkeit anhand von Vergleichsobjekten



Die Objekte in Abbildung 3.8 sind hinsichtlich ihrer Form sehr verschieden, besitzen jedoch einen gleich großen Flächeninhalt und Umfang. Daraus folgt, dass in diesem Fall auch der ShapeIndex für die Objekte gleich ist. Aus dem Index kann demnach nicht auf eine real existierende Form rückgeschlossen werden. Weiterhin sind die räumliche Auflösung und eventuell vorhandene Löcher<sup>29</sup> in Objekten zu beachten. Nicht alle Indikatoren zur Messung von Kompaktheit sind invariant gegenüber einer Veränderung

---

<sup>28</sup>Anstatt ShapeIndex findet sich in der Literatur auch die Bezeichnung jaggedness degree.

<sup>29</sup>Über die Eulersche Charakteristik kann die Anzahl der Löcher bestimmt werden.

der Auflösung. Indikatoren, die gute Ergebnisse bei Objekten mit einer durchgehenden Fläche erzielen, sind mitunter nicht aussagekräftig bei Objekten mit Löchern (vgl. [114], Montero u. Bribiesca).

Die Kompaktheit kann auch durch die Normalised Discrete Compactness erfasst werden. Die Idee dahinter ist, die Anzahl benachbarter Seiten zu bestimmen. Je mehr benachbarte Seiten es gibt, desto kompakter ist das Untersuchungsobjekt. Dieses Kompaktheitsmaß ( $C_{DN}$ ) ist durch folgende Formel gegeben, wobei  $n$  die Anzahl der Pixel und  $U$  der Umfang ist.

$$C_{DN} = \frac{CD - C_{DMin}}{C_{DMax} - C_{DMin}}$$

$$C_D = \frac{4 * n - U}{2}$$

$$C_{DMin} = n - 1$$

$$C_{DMax} = \frac{4 * n - 4 * \sqrt{n}}{2}$$

Dieser Indikator wird durch eine veränderte Auflösung wenig beeinflusst (vgl. [114], Montero u. Bribiesca). Jedoch muss angemerkt werden, dass dieser Indikator abgestimmt ist auf eine zugrundeliegende 4-er Nachbarschaft. Bei verwendeter 8-er Nachbarschaft hat eine diagonale und eine schachbrettartige Anordnung von Pixeln die gleiche Kompaktheit. Dies ist ungünstig, für reale Gegebenheiten aber mitunter vernachlässigbar.

Als letztes hier beschriebenes Maß für die Kompaktheit dient die fraktale Dimension. Je geringer diese Dimension ist, desto kompakter ist die Siedlung. Bei dieser Auffassung von Kompaktheit steht der Siedlungsrand im Vordergrund. Je zerklüfteter die Siedlungsränder, desto weniger kompakt sind die Siedlungen. Der Zusammenhang von Siedlungen und Fraktalen ist bei Batty oder Frankhauser beschrieben (vgl. [11], Batty u. Longley und [58], Frankhauser). Siedlungen müssen allerdings nicht immer fraktal sein, wie Benguigui et al. am Beispiel von Tel Aviv zeigen (vgl. [16], Benguigui u. a.). Nach Analysen von Benguigui et al. kann die israelische Mittelmeerstadt erst ab 1985 als fraktal gelten. Generell ist nach Benguigui auch nicht endgültig beantwortet, warum fraktale Städte existieren (vgl. [16], Benguigui u. a.).



Die bekannteste Definition des Begriffes Dimension ist die des Vektorraumes. Die Dimension entspricht der Mächtigkeit eines minimalen Erzeugendensystems<sup>30</sup>. Diese Aussage ist äquivalent zur Festlegung der Dimension als maximale Anzahl linear unabhängiger Vektoren, die einen Vektorraum aufspannen. Im Gegensatz zu diesen ganzzahligen Dimensionen (Punkt, Linie, Fläche...), besitzen Fraktale eine Dimension aus dem Bereich der gebrochenen Zahlen ( $\mathbb{R}$ ). Mengen werden als Fraktale bezeichnet, wenn ihre fraktale Dimension (Hausdorff-Besicovitch-Dimension<sup>31</sup>) größer als ihre topologische Dimension<sup>32</sup> ist. Die fraktale Dimension ist eine Eigenschaft um Fraktale vergleichen zu können. Im engeren Sinne sind Stadtumrisse keine Fraktale, da sie keine strikte Selbstähnlichkeit aufweisen. Sie besitzen jedoch ein Verhalten, das mathematischen Fraktalen ähnelt und durch statistische Selbstähnlichkeit<sup>33</sup> beschrieben ist. Die Bestimmung der fraktalen Dimension statistischer bzw. natürlicher Fraktale<sup>34</sup> kann für praktische Anwendungen mit Hilfe der durch die Box-Counting Methode gelieferten Box-Dimension durchgeführt werden (vgl. z.B. [21], Block u. a.). Die Box-Dimension<sup>35</sup> ist nach Gleichung (3.4) zu berechnen<sup>36</sup>.

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}} \quad (3.4)$$

Im Gegensatz zu natürlichen Fraktalen wird die Dimension mathematisch konstruierter Fraktale (deterministische Fraktale) folgendermaßen berechnet: ( $D = -\frac{\log(N(\epsilon))}{\log(\epsilon)}$ ). So ist beispielsweise die Dimension der Kochkurve<sup>37</sup>, bestimmt durch  $D = -\frac{\log 4}{\log 3} \approx 1.26$ .  $N = 4$  ist die Anzahl der verkleinerten Versionen des Ausgangsobjektes unter dem gegebenen Skalierungsfaktor  $\epsilon = 3$ .

Die Box-Dimension (Gleichung 3.4) lässt sich gut berechnen, wenn als Datengrundlage Vektordaten zur Verfügung stehen. Da Epsilon nicht beliebig verkleinerbar ist bzw. auch

---

<sup>30</sup>Menge der Linearkombinationen die den Vektorraum aufspannt.

<sup>31</sup>Die Hausdorff-Besicovitch-Dimension (Hausdorff-Dimension) ist die maßtheoretische Definition der fraktalen Dimension.

<sup>32</sup>Die topologische Dimension ist ganzzahlig und entspricht dem gängigen Verständnis. Punkte, Strecken und Flächen haben die Dimensionen 0, 1 und 2.

<sup>33</sup>Ein Fraktal ist statistisch selbstähnlich, wenn Vergrößerungen von Teilen der Menge die gleiche Zufallsverteilung haben.

<sup>34</sup>Dies sind Fraktale, wie sie in der Natur vorkommen. Diese werden unterschieden von den rekursiv erzeugten mathematischen Fraktalen. Es gibt nur eine selbstähnliche Struktur (keine strikte Selbstähnlichkeit). Die Selbstähnlichkeit kommt nur auf einer begrenzten Zahl von Stufen vor.

<sup>35</sup>Zur Box-Dimension ist die Minkowski-Dimension äquivalent.

<sup>36</sup>Boxcounting-Dimension:  $\epsilon$  – *Rasterbreite*,  $N(\epsilon)$  – Anzahl der geschnittenen Rasterzellen.

<sup>37</sup>Die Kochkurve zählt zu den bekanntesten Fraktalen.

die Polygonbegrenzungen nicht beliebig klein sind, kann die Box-Dimension jedoch nur angenähert berechnet werden. Eine Beschreibung der Vorgehensweise zur Bestimmung der fraktalen Dimension mittels der Boxcounting Methode liefern Meiling und Quizhong (vgl. [109], Meiling u. Quizhong). Da bei den vorliegenden Untersuchungen Rasterdaten verwendet wurden, wurde auf den Grenzübergang komplett verzichtet und die fraktale Dimension angenähert nach folgender Formel berechnet.

$$D = \frac{2 * \ln(U)}{\ln(A)} \quad (3.5)$$

Hierbei ist U der Umfang und A der Flächeninhalt des Polygons für das die fraktale Dimension bestimmt werden soll. Praktische Anwendung findet diese Formel auch in den Arbeiten von Förster und Herold (vgl. z.B. [60], Förster u. Kleinschmitt, [74], Herold u. a., [182], XU u. a.). Die Formel kann durch folgende Herleitung erklärt werden (vgl. [11], Batty u. Longley)<sup>38</sup>.

$$N(r) = K * r^{-D}$$

$$L(r) = N(r) * r = K * r^{(1-D)}$$

$$L(r) = K * \left(\frac{R}{r}\right)^D * r = K * R^D * r^{1-D}$$

Nach Lovejoy ([106], Lovejoy) besteht die folgende Beziehung zwischen Umfang und Fläche:  $U \sim \sqrt{A^D}$ . Bei glatten Formen wie Kreisen oder Quadraten ist dabei  $D = 1$ . Wird also  $U_i = R = \sqrt{A_i}$  gesetzt, so ergibt sich  $L_i = G * U_i^D$  bzw.  $L_i = G * A_i^{\frac{D}{2}}$ . Daraus folgt die folgende Gleichung.

$$D = \frac{2 * (\log L_i - \log G)}{\log A_i} \quad (3.6)$$

K ist ein Proportionalitätsfaktor. Weiterhin besteht die Annahme, dass das Skalierungsverhältnis  $\frac{1}{r}$  in direkter Beziehung zu R (Bezug zur Größe des Objektes) steht. Bei einem festen Skalierungsverhältnis ist  $r^{1-D}$  konstant. Die Konstanten gehen in die eingeführte Größe G ein (bei  $G = 1$  sind Gleichung 3.5 und 3.6 identisch).

Zur Berechnung der fraktalen Dimension findet man in der Literatur auch den *Fractal Dimension Index*, der z.B. im Programm FRAGSTATS berechnet werden kann. Hier findet im Vergleich zur oberen Formel noch eine Anpassung statt, in dem der Umfang mit einer Konstanten multipliziert wird. Wenn mehrere Objekte zusammen untersucht

---

<sup>38</sup>Variablen der letzten Formeln: N(r) - Anzahl der Teilstücke, r-Skalierungsfaktor, L(r)-Gesamtlänge, R-Länge des Untersuchungsobjektes, K-Konstante

werden sollen, kann eine mittlere fraktale Dimension berechnet werden. Dafür stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung (vgl. [94], Koijma u. a.).

- Double log fractal dimension (DLFD)
- Mean patch fractal dimension (MPFD)
- Area-weighted mean patch fractal dimension (AWMPFD)

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es für das Programm ArcGIS freie Extensions gibt, die verschiedene Landschaftsstrukturmaße berechnen können. Im Bereich der Vektordaten (genaugenommen Shapefiles) steht die Erweiterung V-Late zur Verfügung. Diese kann auch die fraktale Dimension bestimmen (nach Formel 3.5). Der Patch Analyst als zweite mögliche ArcGIS Erweiterung kann für den Bereich der Fraktale den MPFD als auch den AWMPFD berechnen. Unabhängig vom einem GIS gibt es das Programm fractalyse<sup>39</sup>, das Berechnungen auf Grundlage von tif- bzw. bmp-Bildern tätigt. Die Fraktalität kann für verschiedene Gebiete einer Siedlung unterschiedlich groß sein. Außerdem unterliegt die Fraktalität nach Benguigui et al. Veränderungen im Laufe der Zeit (vgl. [16], Benguigui u. a.).

Urbane Formen werden in dieser Arbeit statisch betrachtet. Formveränderungen von Siedlungen im Laufe der Zeit wurden nicht untersucht, da CORINE Landnutzungsdaten nur für die drei Zeitpunkte 1990, 2000 und 2006 zur Verfügung stehen und diese Daten, wie in Kapitel 3.1 angesprochen, nur bedingt vergleichbar sind.

Dynamische Analysen ermöglichen Rückschlüsse auf potentielle zukünftige Entwicklungen. Eine dynamische Betrachtung von Siedlungsentwicklung wurde z.B. von Turok und Mykhnenko durchgeführt (vgl. [164], Turok u. Mykhnenko). In ihrer Untersuchung zur Bevölkerungsentwicklung verglichen Turok und Mykhnenko 310 europäische Städte im Zeitraum von 1960-2005. Aufgrund der Daten wurden 8 Pfade städtischer Entwicklung herausgestellt.

Bei einer dynamischen Betrachtung europäischer Siedlungen zeigt sich, dass auch Europa immer mehr von einer Zersiedlung betroffen ist. Im Allgemeinen wird unter Zersiedlung das Wachsen von Siedlungen/Siedlungsteilen in die umgebende Landschaft verstanden. In dieser Arbeit wird Zersiedlung allerdings auf den Siedlungsrand bezogen. Die Bestimmung der Zersiedlung erfolgt dabei mittels der fraktalen Dimension. Die Zersiedlung von Landschaft wird nicht betrachtet. Auf Grund seiner Bedeutung für Europa soll dieses

---

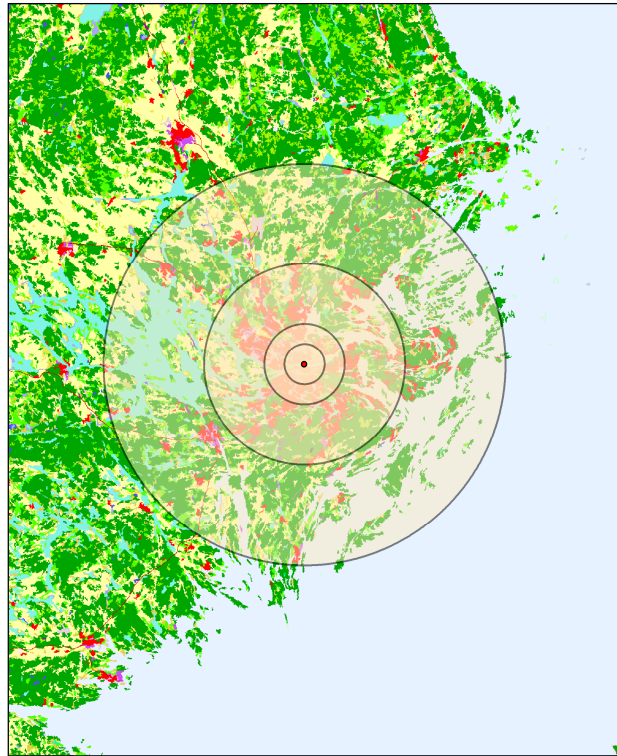
<sup>39</sup>fractalyse: kann unter <http://www.fractalyse> bezogen werden.

Thema hier jedoch nicht unerwähnt bleiben (vgl. [52], European Environmental Agency). So wird angenommen, dass im Jahr 2020 mehr als 80% der Europäer in Städten leben. Der Bericht der EEA geht insbesondere auf die Zersiedlung entlang von Transportachsen und Küsten ein. Küsten als sensible Ökosysteme sind besonders zu beachten. Der Ausbau an Bebauungsflächen europäischer Städte steigt bis auf Ausnahmen stärker an als die Einwohnerzahl (vgl. [52], European Environmental Agency).

Die angesprochenen Indikatoren zum Berechnen der Kompaktheit einer Siedlung stellen auch ein Messkonzept für die Erfassung von Zersiedlung dar, decken jedoch nur einen Teil dieses Begriffes ab. Galster und Koautoren stellen die Komplexität, Erfassung und Messung sowie die Schwierigkeiten, die mit dem Begriff Zersiedlung verbunden sind umfassend dar. So beinhaltet laut Galster Zersiedlung einen bzw. mehrere der folgenden Indikatoren: Density, continuity, concentration, clustering, centrality, nuclearity, mixed uses und proximity (vgl. [62], Galster u. a.). Diese müssen durch geeignete Messkonzepte erfasst werden.

Die Schwierigkeit im Umgang mit dem Begriff Zersiedlung kommt in folgendem Satz zum Ausdruck. “*Sprawl has become the metaphor of choice for shortcomings of the suburbs and the frustration of the central cities. It explains everything and nothing*“ (vgl. [62], Galster u. a., S.681). Weiterhin werden durch Galster 6 Gruppierungen beschrieben, in die Zersiedlungsdefinitionen fallen können. Dies zeigt wiederum die Komplexität im Umgang mit diesem Begriff. Zersiedlung wird demnach nicht nur auf eine Siedlung, sondern auf Siedlungszusammensetzungen hinsichtlich festgelegter Räume untersucht. Prinzipiell können die aufgezählten Dimensionen von Zersiedlungen mit Hilfe der CORINE Siedlungsdaten näher bestimmt werden. So ist es möglich, die Konzentration bzw. Clusterung von Siedlungen für bestimmte europäische Räume zu untersuchen. Dimensionen wie Nutzungsmix oder Nähe bedingen jedoch die Aufnahme von weiteren Landnutzungsklassen aus der CORINE Erfassung in die Untersuchung. In der nachfolgenden Abbildung 3.9 ist Stockholm mit seiner näheren Umgebung eingezeichnet. Die Ringe kennzeichnen den 5, 10, 25 und 50km Abstand um das Stadtzentrum.

**Abbildung 3.9:** Siedlungsgradienten am Beispiel von Stockholm



Mit Hilfe von Siedlungsumgebungen, wie Sie in Abbildung 3.9 zu sehen sind, ist es möglich, den Grad der Zersiedlung zu bestimmen. Guérois und Pumain nutzten die Umgebungsringe um Gradienten für die Siedlungslandnutzung zu bestimmen (vgl. [68], Guérois u. Pumain). Diese Untersuchung zur Zersiedlung stützte sich auf CORINE Daten und wurde auf vierzig europäische Städte angewendet. Die Einbeziehung weiterer Landnutzungsklassen wie z.B. Wälder würde darüber hinaus grobe Abschätzungen über das vorhandene Biomassepotential von Regionen ermöglichen, womit eine Beziehung zum Thema Energie hergestellt werden kann. Bei der Untersuchung von Siedlungsbeziehungen sind Indikatoren wie Freiflächenanteil, effektiver Freiflächenanteil oder Effizienz der räumlichen Siedlungsstruktur von Bedeutung (vgl. [147], Schweppe-Kraft).

Nach der Beschreibung der einzelnen Indikatoren in diesem Abschnitt wird nachfolgend ein Werkzeug zur Erfassung von Siedlungsformen vorgestellt.

### 3.5 Werkzeug zur Erfassung der Siedlungsformen

In diesem Abschnitt wird ein Werkzeug vorgestellt, mit dem Siedlungsformen erkannt und ausgewertet werden können. Dazu wurde ein Graphical User Interface (GUI) innerhalb von MATLAB programmiert. Das GUI bietet die Möglichkeit Teilgebiete in Europa auszuwählen, um diese auf Ihre Siedlungsformen hin zu analysieren. Da zumeist nur spezielle Teilräume von Interesse sind, ist es wichtig eine Gebietsauswahl treffen zu können. Die Analyse der Siedlungsformen bestimmter Gebiete kann auch dazu genutzt werden, Gebiete ähnlicher Siedlungsformen und Siedlungsverteilungen hinsichtlich eines festgelegten Ähnlichkeitsmaßes in Europa zu identifizieren. Auf Grund der Möglichkeit schnell Matrizenoperationen auszuführen, ist MATLAB eine geeignete Plattform für die Auswertung von Rasterbildern. Darüber hinaus hat MATLAB für den Anwender den Vorteil, dass spezielle Vorstellungen und Ideen durch eigene Algorithmen schnell implementiert werden können. Das Werkzeug zur Siedlungserfassung kann demnach schnell erweitert und verbessert werden.

Abbildung 3.10: MATLAB Tool zur Erfassung von Siedlungsformen

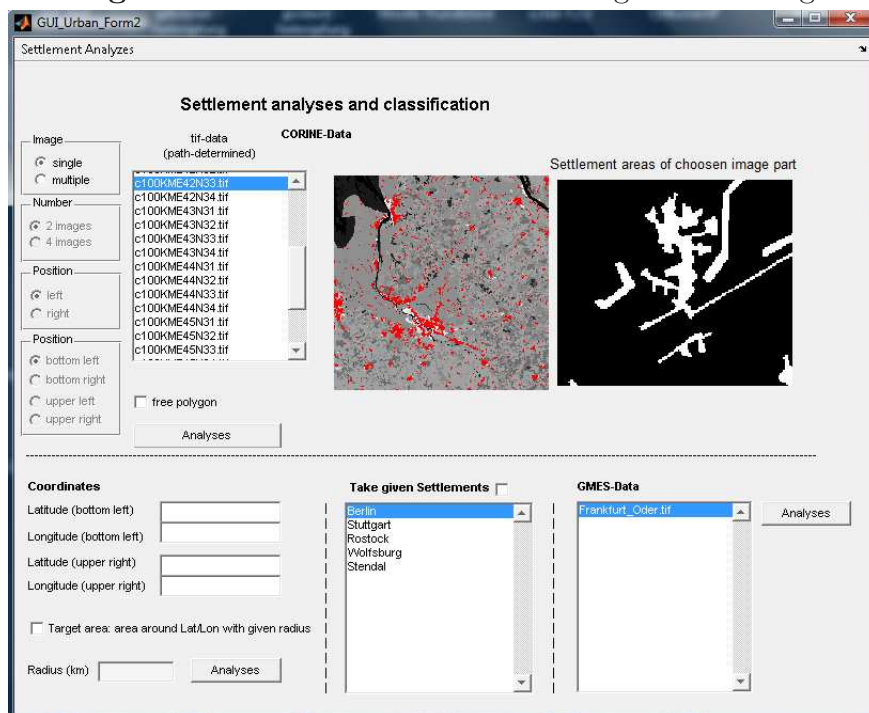


Abbildung 3.10 zeigt einen Screenshot des entwickelten Analysewerkzeugs. Implementiert wurde nur die Betrachtung der Siedlungen an sich. Jedoch ist eine Erweiterung



hinsichtlich der Siedlungsbeziehungen möglich. Da gewünschte Auswahlgebiete über Bildgrenzen hinweg bestehen können, können für eine zusammenhängende Betrachtung einzelne Rasterbilder zusammengesetzt werden. Weiterhin ist in Abbildung 3.10 erkennbar, dass das Auswahlgebiet als Binärbild angezeigt wird und es mehrere Möglichkeiten gibt, eine Gebietsauswahl zu treffen. Die für die Gebietsauswahl in dem programmierten Analysewerkzeug zur Verfügung stehenden Möglichkeiten werden nachfolgend beschrieben. Ganz allgemein kann das zu untersuchende Gebiet entweder durch eine graphische Auswahl oder durch geographische Koordinaten festgelegt werden.

#### Untersuchungsgebiet - graphische Auswahl

Entscheidet sich der Nutzer für eine graphische Auswahl, so bietet ihm das programmierte Analysewerkzeug zwei Optionen zur Bestimmung des Untersuchungsgebietes:

- zeichnen eines Rechteckes über dem Zielgebiet
- zeichnen eines Freihandpolygones über dem Zielgebiet

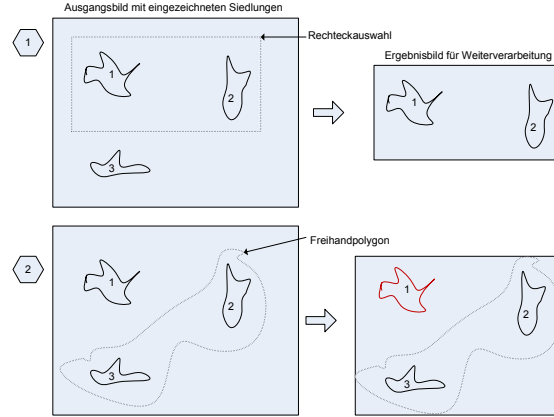
Im ersten Schritt wählt der Nutzer mit Hilfe eines Listenfeldes eine Bilddatei im tif-Format aus<sup>40</sup>. Ein tif-Bild deckt ein Gebiet von  $100km * 100km$  ab. Dieses umfasst entweder das gesamte Zielgebiet oder beinhaltet zumindest Teile davon. Wenn sich das Zielgebiet über Bildgrenzen hinweg erstreckt, ist es möglich Nachbarbilddateien zu berücksichtigen. Das Ausgangsgebiet kann also aus einer, zwei oder vier Bilddateien bestehen. Die potentiellen Anschlussbilder werden dabei über die entsprechenden Dateinamen identifiziert. Durch das Zeichnen eines Rechteckes oder eines Freihandpolygons kann nun im nächsten Schritt die Matrix des Untersuchungsgebietes festgelegt werden. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass ein Bild (Matrix) immer rechteckig ist, was bei Freihandpolygonen im Allgemeinen nicht gegeben ist. Daher wird zu jedem Freihandpolygon die minimale Boundingbox (entspricht der minimalen Boundingbox der konvexen Hülle des Objekts) bestimmt. Dabei kann es passieren, dass Siedlungen in der Boundingbox vorkommen, die nicht oder nur zum Teil in dem durch den Nutzer bestimmten Freihandbereich liegen. In der vorliegenden Implementierung wurden nur Siedlungen betrachtet, die vollständig im Auswahlbereich liegen. Abbildung 3.11 zeigt noch einmal den graphischen Auswahlprozess. Es wird deutlich, dass Nachbearbeitungen der Teilbilder notwendig werden, wenn die Zielauswahl Siedlungen schneidet oder Siedlungen in der

---

<sup>40</sup>Die tif Bilder (RGB) beinhalten die CORINE Daten, wobei die Dateien durch eine Vorverarbeitung nur noch die Siedlungsinformationen beinhalten.

minimalen Boundingbox liegen, die nicht zur Zielauswahl gehören. Die durch den Auswahlprozess erzeugten und teilweise nachbearbeiteten Teilbilder stehen nun für weitere Analysen zur Verfügung.

**Abbildung 3.11:** Graphische Auswahl des Untersuchungsgebietes



#### Untersuchungsgebiet - Auswahl über geographische Koordinaten

Eine weitere Möglichkeit der Auswahl des zu untersuchenden Gebietes besteht darin, geographische Koordinaten (Dezimaldarstellung) anzugeben, die das gewünschte Gebiet umfassen. Die Koordinaten legen den westlichsten Punkt geringster geographischer Breite und den östlichsten Punkt höchster geographischer Breite fest. Somit ist die Boundingbox für das Untersuchungsgebiet durch die Punkte festgelegt. Da die georeferenzierten Bilder in flächentreuer Azimutalprojektion (Lambertsche Azimutalprojektion) vorliegen, ist eine Umrechnung der geographischen Koordinaten notwendig. Dafür kann der von Snyder ([150], Snyder) beschriebene Algorithmus verwendet werden:

Hochwert,  $x = x_0 + B * D * \cos(\beta) * \sin(\lambda - \lambda_0)$

Rechtswert,  $y = y_0 + B/D * (\cos(\beta_0) * \sin(\beta) + \cos(\beta) * \sin(\beta_0) * \cos(\lambda - \lambda_0))$

Hierbei gelten die folgenden Gleichungen:

$$B = 2 * R_q / \sqrt{1 + \sin(\beta_0) * \sin(\beta) + \cos(\beta_0) * \cos(\beta) * \cos(\lambda - \lambda_0)}$$

$$D = a * m / (R_q * \cos(\beta_0))$$



$$R_q = a * \sqrt{q_p/2}$$

$$m = \cos(\phi) / \sqrt{1 - e^2 * \sin(\phi) * \sin(\phi)}$$

$$\beta = \arcsin(q/q_p)$$

$$q = (1 - e^2) * ((\sin(\phi)/(1 - e^2 * \sin(\phi) * \sin(\phi))) - (1/(2 * e)) + \ln((\frac{1 - e * \sin(\phi)}{1 + e * \sin(\phi)})))$$

$$e^2 = 2 * f - f^2$$

$$\beta_0 = \arcsin(q_0/q_p)$$

$$q_0 = (1 - e^2) * ((\sin(\phi_0)/(1 - e^2 * \sin(\phi_0) * \sin(\phi_0))) - (1/(2 * e)) + \ln((\frac{1 - e * \sin(\phi_0)}{1 + e * \sin(\phi_0)})))$$

$$q = (1 - e^2) * ((\sin(\phi)/(1 - e^2 * \sin(\phi) * \sin(\phi))) - (1/(2 * e)) + \ln((\frac{1 - e * \sin(\phi)}{1 + e * \sin(\phi)}))) \text{ (für } \phi = 90^\circ \text{)}$$

Gegeben sind hierbei die Abflachung  $f$  (inverse Abflachung des Ellipsoiden GRS80: 298.257222101), die große Halbachse  $a$  (6378137m), die Bezugskordinaten ( $\phi_0 = 52^\circ N$ ,  $\lambda_0 = 10^\circ E$ ) sowie die Werte für false Northing (3210000m) und false Easting (4321000m).

In der praktischen Anwendung wurde auf eine schon implementierte Koordinatenabbildung zurückgegriffen. Hierzu wurde die Statistiksoftware R verwendet<sup>41</sup>. Für die Koordinatenabbildung in R wurde das Paket `rgdal`<sup>42</sup> genutzt. `Rgdal` ermöglicht einen Zugriff auf die freie Programmbibliothek GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) als auch auf die freie kartographische Projektionsbibliothek Proj.4<sup>43</sup>. Die Verwendung des R-D(COM)<sup>44</sup> Servers ermöglicht es, R Berechnungen für andere Programme kompatibel zu machen. Im folgenden ist beispielhaft die Koordinatentransformation eines Punktes ( $\phi = 50^\circ N$ ,  $\lambda = 5^\circ E$ ) im R Code dargestellt.

### R-Code

```
Punkt = SpatialPoints(data.frame(x=c(5),y=c(50)))
proj4string(Punkt) = CRS("+init=epsg:4326")
spTransform(Punkt, CRS("+init=epsg:3035"))
```

---

<sup>41</sup>R ist eine freie Implementation der Sprache S

<sup>42</sup>Informationen zu `rgdal`: <http://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf>

<sup>43</sup>Informationen zu Proj.4: <http://trac.osgeo.org/proj/>

<sup>44</sup>Informationen zu R-D(COM): <http://cran.r-project.org/contrib/extra/dcom/00ReadMe.html>

Als Lageparameter für Siedlungen werden die Koordinaten (Lambert-Koordinaten LAEA) des Siedlungszentroids angegeben. Darüber ist es möglich, Entfernungen zu Nachbarsiedlungen zu bestimmen. Neben den Ortskoordinaten sind aber auch andere Lagebeziehungen, wie beispielsweise die Höhenlage, die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Land und einer Klimazone oder die Entfernung zum Meer für eine Siedlung charakteristisch. Neben der graphischen Auswahl und der Bestimmung des Untersuchungsgebietes mit Hilfe geographischer Koordinaten ist es prinzipiell möglich, weitere Kriterien für eine Gebietsauswahl durch den Nutzer festzulegen. Bisher wurde die kürzeste Entfernung zum Meer als Berechnung in dem Analysewerkzeug implementiert und eine Verschneidung mit Landesgrenzen durchgeführt. Die kürzeste Entfernung zum Meer wurde durch den Abstand der Siedlung zur Küstenlinie Europas berechnet.

Im Ergebnis liefert das programmierte Werkzeug ein Binärbild der entsprechenden Siedlungen im Auswahlgebiet sowie eine tabellarische Auflistung der Siedlungen (exportierte Datei im .pdf bzw. xls Format). Zusätzlich werden die Siedlungsform beschreibenden Parameter (Zentroid, Umfang, Fläche, fraktale Dimension,...) ausgegeben, die Landeszugehörigkeit der Siedlungen aufgezeigt und die Berechnung des Abstandes zu Nachbarsiedlungen und zur europäischen Küstenlinie ermöglicht.

Das hier programmierte Werkzeug kann beliebig erweitert werden. Um beispielsweise Siedlungen mit einer bestimmten Höhenlage zu betrachten, kann ein digitales Höhenmodell, wie es die EEA basierend auf dem United States Geological Survey (GTOPO30) zur Verfügung stellt, herangezogen werden. Nutzt man diese frei zugänglichen Daten, so könnte jedem Zentroid eine Höhenlage zugeordnet werden. Über die Internetpräsenz des European Climate Assessment & Dataset (Royal Netherlands Meteorological Institute) können europäische Klimadatensätze bezogen werden, so dass es auch möglich ist, Siedlungen mit klimarelevanten Daten zu verknüpfen. Denkbar ist auch, in die Siedlungsauswahl weitere CLC Landnutzungsklassen einzubeziehen, um z.B. Siedlungen an Gewässern für ein bestimmtes Gebiet zu extrahieren. Weiterhin wären Bevölkerungsdaten eine wichtige Datenquelle. Daten über die Bevölkerungsdichte in Europa<sup>45</sup> werden auch von der EEA bereitgestellt.

Um grobe Abschätzungen über den Energiebedarf von Siedlungen im Untersuchungsraum durchführen zu können, müssten weitere Informationen beispielsweise zu administrativen Grenzen von Siedlungen hinzugezogen werden. Eine Verschneidung der CORINE

---

<sup>45</sup>Ist als Raster von den Internetseiten der EEA als GeoTiff basierend auf CLC 2000 Daten zu beziehen (popu01clcv5.tif).

Daten mit administrativen Siedlungsgrenzen ist notwendig, da sich statistische Daten immer auf administrative Grenzen beziehen. Hierzu kann im Open Source Bereich für einzelne Gebiete der OSM Relation Analyzer genutzt werden (<http://ra.osmsurround.org>). Administrative Grenzen können dann z.B. als .xml oder .gpx Datei geladen werden. Inwieweit die Genauigkeit der Siedlungsgrenzen innerhalb Europas gegeben ist, kann vom Autor nicht abgeschätzt werden. Um eine Genauigkeit der Daten sicherzustellen kann auf kommerzielle Datenanbieter zurückgegriffen werden. Prinzipiell ist die Verknüpfung von urbaner Form mit energetischen Fragestellungen auf Grund der vielfältigen Einflüsse auf den Energiebedarf, aber auch wegen der Verfügbarkeit von dafür benötigten Daten schwierig. Derzeit zur Verfügung stehende CORINE Daten, die nur zwei Siedlungsklassen unterscheiden, sind für Untersuchungen des Energiebedarfes von Siedlungen nur sehr eingeschränkt geeignet.

Nachdem in diesem Abschnitt ein erstelltes Werkzeug zur Siedlungsformenanalyse vorgestellt wurde, zeigt das nächste Kapitel die Ergebnisse der europäischen Siedlungsanalyse.

## 3.6 Auswertung der Formanalyse für Europa

In den folgenden Unterkapiteln werden die europäischen Siedlungsflächen, basierend auf den CORINE Land Cover Daten, analysiert. Zuerst wird mittels deskriptiver Statistik ein Überblick über die Siedlungsstruktur gegeben. Danach erfolgt in Unterkapitel 3.6.2 eine detaillierte Analyse der Siedlungsverteilungen mit Hilfe von Verfahren der explorativen Statistik. In Unterkapitel 3.6.3 werden alle Siedlungen ohne Unterscheidung zwischen Continuous und Discontinuous urban fabric genauer betrachtet, bevor in Unterkapitel 3.6.4 nur die dichter bebauten Siedlungen (Continuous urban fabric) analysiert werden. Abschließend wird im letzten Unterkapitel auf die Ranggrößenregel eingegangen, und diese auf Flächengrößen angewendet.

### 3.6.1 Siedlungsgrößen im Überblick

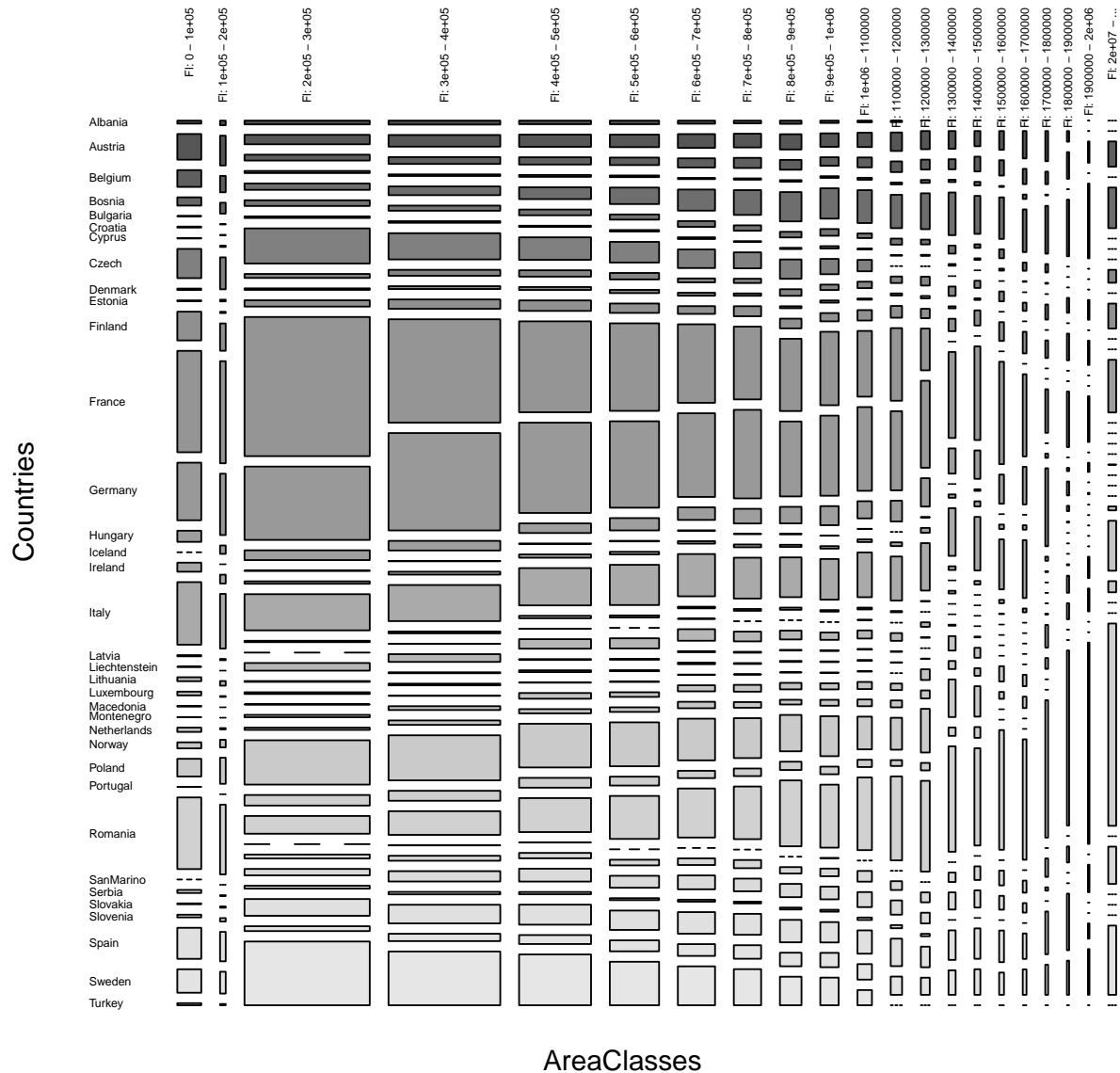
Einführend soll in diesem Kapitel ein Überblick über die Siedlungsgrößenklassenverteilungen gegeben werden. Dazu zeigt die Abbildung 3.12 die Größenverteilung der bei CLC partizipierenden Länder<sup>46</sup> anhand eines Mosaicplots. Es ist ersichtlich, dass die meisten Siedlungen im Bereich von 20-40ha<sup>47</sup> liegen. Länder mit bekannter ähnlicher Bevölkerungszahl können verglichen werden. So ist trotz geringerer Bevölkerungszahl der Anteil kleiner Siedlungen in Frankreich größer als in Deutschland. In der Türkei sind dagegen deutlich weniger kleinere Siedlungen vorhanden als in Deutschland, wobei die Gesamtbevölkerung beider Länder sich nur um wenige Prozent unterscheidet. Die Siedlungsstruktur der betrachteten Länder ist demnach verschieden. In Frankreich und der Türkei konzentriert sich die Bevölkerung auf die Städte Paris bzw. Istanbul. So hat Istanbul als Metropole mehr als 10 Millionen Einwohner.

---

<sup>46</sup>Malta wird in diesen Analysen nicht betrachtet. Die Daten von Malta wurden zu Italien gerechnet. Da nur wenige Siedlungen in Malta vorhanden sind, führt dies zu vernachlässigbar geringen Abweichungen von den tatsächlichen italienischen Daten.

<sup>47</sup>Die Einheit im Diagramm ist  $m^2$ .

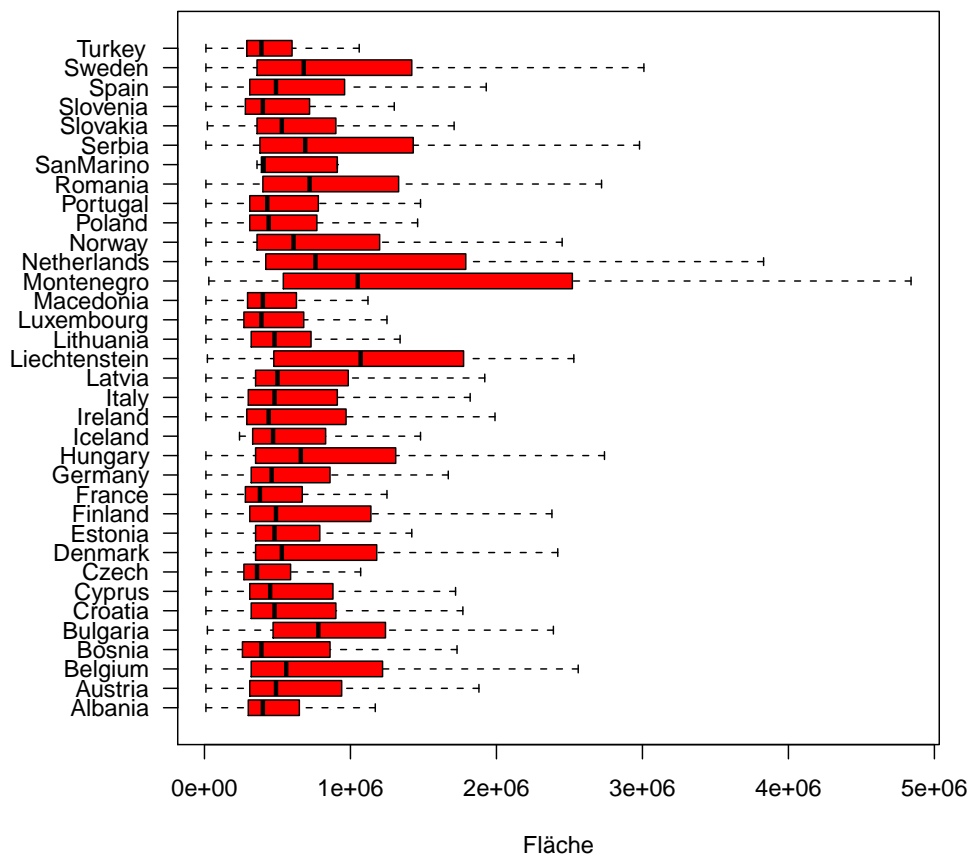
**Abbildung 3.12:** Gesamtsicht über die Verteilung der Größe europäischer Siedlungsflächen



Das Mosaicplot gibt einen ersten groben Überblick über die Siedlungsstruktur der betrachteten Länder. Eine genauere Übersicht liefert die Darstellung der Siedlungsflächen mit Hilfe von Boxplots (vgl. Abb. 3.13). Boxplots ermöglichen einen Vergleich der Siedlungsstruktur hinsichtlich der mittleren Größe sowie der Streuung. Sie liefern Informationen über das 25%, das 50% (Median) sowie das 75% Quantil und daraus abgeleiteten Informationen über den Interquartilsabstand. Ausreißer wurden auf Grund der schlech-

teren Lesbarkeit nicht in die Abbildung aufgenommen.

**Abbildung 3.13:** Boxplots der Siedlungsflächen europäischer Staaten



Aus den Boxplots kann abgelesen werden, dass die Streuung der Siedlungsgrößen für die verschiedenen Länder zum Teil deutlich voneinander abweicht. Die mittlere Siedlungsgröße (Median) ist in einem Bereich zwischen 30-70ha anzusiedeln. Die mittlere Siedlungsgröße von Schweden übersteigt z.B. das 75% Quantil der Siedlungsgrößen der Türkei. Die osteuropäischen Länder (vgl. Ungarn, Bulgarien, Rumänien) besitzen größere mittlere Siedlungsgrößen im Vergleich zu den anderen Ländern. Aufgrund der geringen Anzahl von Siedlungen sind die Angaben für Kleinststaaten wie Lichtenstein und Montenegro im europäischen Vergleich nicht aussagekräftig.

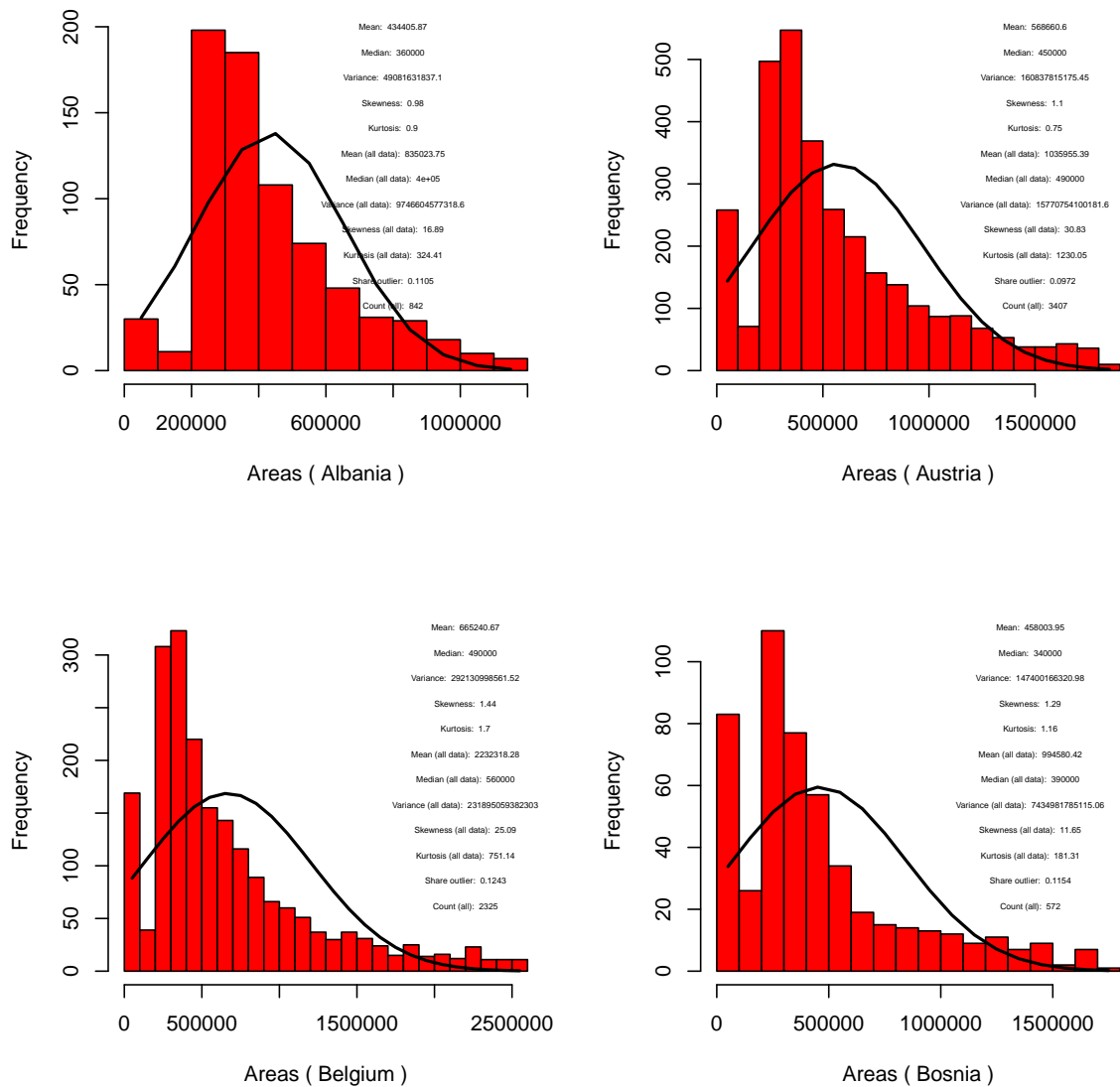
Für eine weitergehende Betrachtung der Siedlungsgrößen wurde eine Klasseneinteilung vorgenommen. Durch die Klasseneinteilung können Aussagen über die zugrundeliegende Verteilung der Siedlungsgrößen getroffen werden. In der folgenden Abbildung (vgl. Abb.

3.14) ist daher die Siedlungsgrößenverteilung für vier Länder (Albanien, Österreich, Belgien und Bosnien) mittels eines Histogramms dargestellt. Die Verteilung der Siedlungsgrößen der fehlenden CLC Länder befinden sich als Histogramme im Anhang (S. 163 ff). Abbildung 3.14 zeigt, dass bei den vier betrachteten Ländern die Verteilung der Siedlungsgrößen von der Normalverteilung abweicht und rechtsschief (linkssteil) ist. Die Gesamtzahl der Siedlungen, wie auch der Anteil der Ausreißer<sup>48</sup>, sind im Histogramm als Zahlenwert angegeben. *All data* bedeutet in der Abbildung, dass alle Siedlungen betrachtet wurden, wohingegen im Alternativfall die Ausreißer keine Berücksichtigung finden.

---

<sup>48</sup>Histogramme wurden in R mit der Option `show.outliers=FALSE` gezeichnet.

Abbildung 3.14: Histogramme der Siedlungsgrößenverteilung einzelner Länder



Die durch die Histogramme optisch dargestellten Verteilungen werden im nachfolgenden Kapitel mittels Teststatistiken einer näheren Untersuchung unterworfen. Somit kann z.B. die Frage beantwortet werden, ob die Siedlungsgrößenverteilungen einzelner Länder einer gemeinsamen Verteilung entstammen und die Staaten damit ähnliche Siedlungsstrukturen aufweisen.



### 3.6.2 Analyse der Siedlungsgrößenverteilung

Die Daten der Siedlungsflächen werden mit Hilfe von Methoden der explorativen Statistik weiter analysiert. So wird untersucht, ob sich die Siedlungsverteilungen einzelner Länder hinsichtlich ihrer Eigenschaften, wie Mittelwert oder Varianz unterscheiden. Der Hintergrund dieser Untersuchung besteht darin, dass wie in Kapitel 2 dargelegt, urbane Formen einen Einfluss auf die Energiebereitstellung als auch auf die Energienachfrage ausüben. Es stellt sich also die Frage, ob nationale Siedlungsstrukturen einen Erklärungswert für den unterschiedlichen Energieverbrauch der europäischen Länder besitzen könnten.

Um zu beurteilen, ob die Siedlungsgrößen der einzelnen Länder einer identischen Verteilung entstammen, kann der  $\chi^2$  - Homogenitätstest angewendet werden. Die Siedlungen wurden hierfür in 21 Größenklassen eingeteilt. In der Literatur findet sich als Faustregel, dass bis zu 20 Klassen gewählt werden sollten (vgl. z.B. [28], Bradtke). Somit befindet sich diese Einteilung an der Obergrenze, was auf Grund der Größe des Datenumfanges legitimiert ist. Bei der Anwendung des  $\chi^2$  - Homogenitätstests ist darauf zu achten, dass mindestens 80% der Erwartungswerte ( $E_{ij}$ ) in der Kontingenztafel  $\geq 5$  sein sollten sowie, dass die Erwartungswerte nicht  $\leq 1$  sind (vgl. [22], Bortz u. a., [139], Sachs u. Hedderich). Der  $\chi^2$  - Homogenitätstest setzt keine bestimmte zugrundeliegende Verteilung, wie z.B. eine Normalverteilung, voraus. Er ist demnach ein verteilungsfreier Test. Wie in den gezeigten Histogrammen schon rein optisch ersichtlich ist, kann eine Normalverteilung auch nicht unterstellt werden.

Die Nullhypothese für den Homogenitätstest lautet:  $H_0 : F_1(x_1) = F_2(x_2)$ .

Sie besagt, dass die unabhängigen Stichproben  $X_1$  und  $X_2$  identisch verteilt sind. Der tabellarische  $\chi^2$  Wert ( $\chi^2(1 - \alpha, df = 20)$ ) beträgt 31.410. Ist dieser Wert kleiner als die zu berechnenden Prüfgröße, so muss die Nullhypothese verworfen werden.

Verglichen wurde die Siedlungsverteilung von Deutschland mit den Verteilungen seiner Nachbarn Polen und Frankreich. Des Weiteren fand ein Vergleich zwischen Frankreich als ein westliches und Rumänien als ein östliches Land sowie von Schweden und Spanien als ein nördliches und ein südlich gelegenes europäischen Land statt.

Die berechneten empirischen  $\chi^2$  Werte sind in Tabelle 3.3 aufgeführt.

**Tabelle 3.3:** Empirische  $\chi^2$  Werte für Ländervergleiche

Deutschland-Polen	$\chi^2 = 164.82$
Deutschland-Frankreich	$\chi^2 = 1095.28$
Frankreich-Rumänien	$\chi^2 = 3986.20$
Schweden-Spanien	$\chi^2 = 271.49$

Wie aus den Werten ersichtlich ist, muss die Nullhypothese verworfen werden (für den Vergleichswert wurde  $\alpha = 0.05$  festgesetzt).

Der  $\chi^2$  - Homogenitätstest für die betrachteten Länder zeigt, dass die Siedlungsflächen nicht aus einer gemeinsamen Verteilung stammen. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass sich die Siedlungsstrukturen voneinander unterscheiden. Da immer noch die Möglichkeit besteht, dass die Verteilungen gleiche mittlere Siedlungsgrößen besitzen, wird im nächsten Schritt geprüft, ob sich die Mittelwerte der gegebenen Verteilungen signifikant unterscheiden.

Um zu prüfen, ob sich die Mittelwerte gegebener Verteilungen signifikant unterscheiden, kann bei Nichtvorliegen einer Normalverteilung der Wilcoxon-Rangsummentest benutzt werden. Hierzu werden die Variablenausprägungen geordnet und ihnen werden Ränge zugewiesen. Bei großen Stichproben bzw. auftretenden Bindungen können im allgemeinen keine exakten p-Werte aus der Wilcoxon Verteilung angegeben werden. Da bei großen Stichproben näherungsweise Normalverteilung (Rangsummen) unterstellt wird, werden die p-Werte als Quantile der Standardnormalverteilung bestimmt. Hierzu werden z-Werte aus den Rangsummen sowie aus der Information über die Stichprobenumfänge bestimmt (vgl. z.B. [139], Sachs u. Hedderich). Exakte Verfahren stellt die Bibliothek *exactRankTests* bzw. die Bibliothek *coin* zur Verfügung (vgl. [139], Sachs u. Hedderich).

Die Nullhypothese für den Wilcoxon-Rangsummentest lautet:  $H_0 : a = 0$ , die Alternativhypothese  $H_1 : a \neq 0$  (zweiseitige Hypothese,  $G(x) = F(x - a)$ ). Die berechneten p-Werte sind nachfolgend aufgeführt (vgl. Tabelle 3.4).

**Tabelle 3.4:** Test auf Gleichheit der Mittelwerte (Wilcoxon-Test)

Deutschland-Polen	p-Wert= 2.305e-13
Deutschland-Frankreich	p-Wert=2.2e-16
Frankreich-Rumänien	p-Wert= 2.2e-16
Schweden-Spanien	p-Wert=2.2e-16

wilcox.exact(vektor1,vektor2,alternative="two.side",pairs=FALSE)

Wie aus den Werten ersichtlich ist, muss die Nullhypothese verworfen werden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die betrachteten Verteilungen keiner gemeinsamen Verteilung entstammen und auch unterschiedliche mittlere Siedlungsgrößen aufweisen.

Da die p-Werte des Wilcoxon-Rangsummentests extrem klein sind, kann zur Überprüfung der mittleren Siedlungsgröße zusätzlich der Mediantest herangezogen werden. Zu beachten ist dabei, dass dieser Test im Allgemeinen eine geringere Power<sup>49</sup> als auch eine geringere relative Effizienz als vergleichbare Tests aufweist (vgl. [59], Freidlin u. Gastwirth). Für den Mediantest werden die zu untersuchenden Daten der beiden Verteilungen zusammengenommen und der gemeinsame Median bestimmt. Anschließend wird die Anzahl der Werte bestimmt, für die die beiden zu vergleichenden Verteilungen kleiner bzw. größer als der gemeinsame Median sind. Diese Daten werden in eine  $2 \times 2$  Matrix geschrieben, so dass die übliche Analyse einer Vierfeldertafel durchgeführt werden kann. Die Prüfgröße berechnet sich nach der folgenden Formel  $\hat{\chi} = (\frac{a-E_a)^2}{E_a} + \frac{b-E_b)^2}{E_b} + \frac{c-E_c)^2}{E_c} + \frac{d-E_d)^2}{E_d}$ . Die Nullhypothese für den Mediantest lautet:  $\tilde{\mu}_1 = \tilde{\mu}_2$

Für  $df=1$  und  $\alpha = 0.05$  beträgt  $\chi^2 = 3.841$ . Ist die berechnete Prüfgröße größer als der tabellarische kritische Wert, so wird die Nullhypothese abgelehnt.

**Tabelle 3.5:** Test auf Gleichheit der Mittelwerte (Median-Test)

Deutschland-Polen	$\chi^2=20.772$	p-Wert= 5.173e-06
Deutschland-Frankreich	$\chi^2 = 568.6317$	p-Wert< 2.2e-16
Frankreich-Rumänien	$\chi^2 = 2644.545$	p-Wert< 2.2e-16
Schweden-Spanien	$\chi^2 = 132.168$	p-Wert< 2.2e-16

chisq.test(Vierfeldertafel,correct=FALSE)

Wie in Tabelle 3.5 dargestellt ist, kann die Nullhypothese für die betrachteten Länder abgelehnt werden. Der Mediantest zeigt demnach auch signifikante Unterschiede der mittleren Siedlungsgrößen im Paarvergleich.

Da bisher lediglich die Mittelwerte verglichen wurden, werden im nächsten Schritt die Streuungen der betrachteten Siedlungsflächen untersucht. Die Gleichheit von Varianzen (Homoskedastizität) kann mittels des Levene-Tests geprüft werden. Die Nullhypothese für den Levene-Test lautet:  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ .

---

<sup>49</sup>Die Power wird durch folgende Formel beschrieben:  $Power = 1 - \beta$  ( $\beta$  ist der Fehler 2. Art, also die Wahrscheinlichkeit  $H_0$  nicht abzulehnen, obwohl  $H_1$  richtig ist.)

**Tabelle 3.6:** Test auf Gleichheit der Varianzen (Levene-Test)

Deutschland-Polen	L=5.1646	$p - Wert = 0.02306$
Deutschland-Frankreich	L=12.6592	$p - Wert = 0.0003741$
Frankreich-Rumänien	L=13.6531	$p - Wert = 0.0002202$
Schweden-Spanien	L=7.7429	$p - Wert = 0.005404$

`levене.test(vektor,group = gruppierung)`

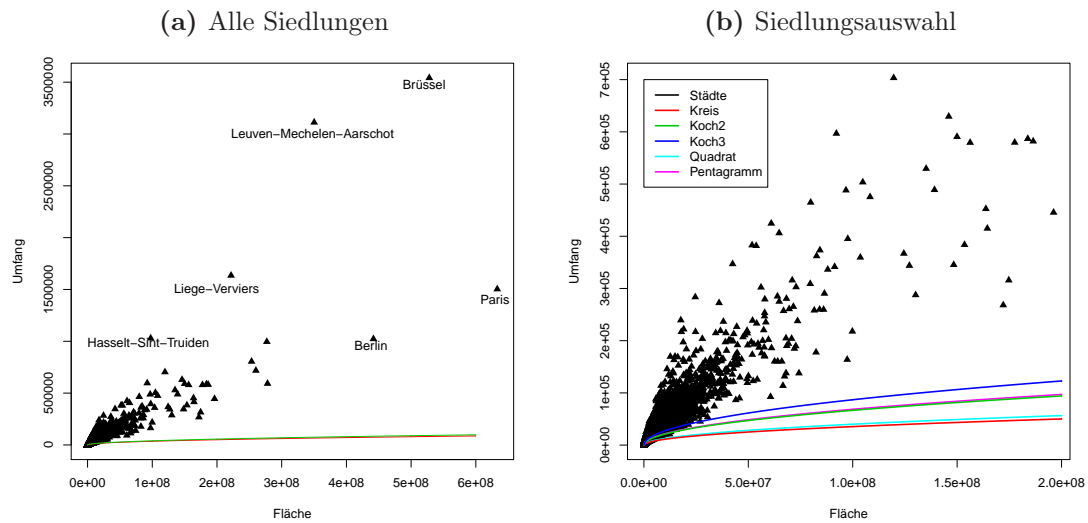
Auch hier zeigen die Ergebnisse, dass die Nullhypothese bei Unterstellung eines 5% Signifikanzniveaus jeweils verworfen werden muss (vgl. Tabelle 3.6).

Die in diesem Unterkapitel durchgeführten Tests weisen darauf hin, dass in den betrachteten Ländern unterschiedliche Siedlungsstrukturen zu Grunde liegen. Neben weiteren Einflussfaktoren könnte die Siedlungsstruktur demnach einen Erklärungswert für national unterschiedliche Energieverbräuche liefern.

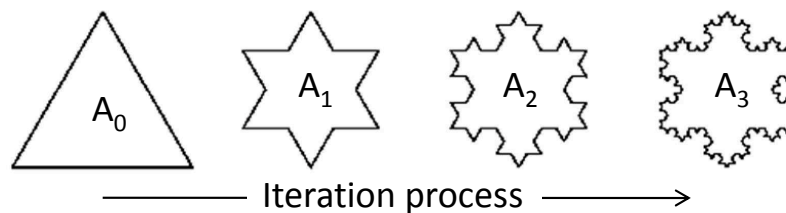
### 3.6.3 Gemeinsame Auswertung der Continuous und Discontinuous Klassifikationen

Nach der Untersuchung der Siedlungsverteilung wird in diesem Kapitel die urbane Form betrachtet. Als Datengrundlage dienen wiederum die *Corine Land Cover* Siedlungsdaten. Bei der Formbetrachtung wird insbesondere die Kompaktheit von Siedlungen analysiert. Die Beziehung von Form und Energie wurde in einem vorangegangenen Kapitel näher beschrieben (vgl. Abschnitte 2.2, 2.3 und 2.4). In diesem Abschnitt werden für die Formbetrachtung alle Siedlungen berücksichtigt, bevor im darauf folgenden Kapitel 3.6.4 nur die dichter bebauten Siedlungen untersucht werden.

In Abbildung 3.15 sind für die europäischen Siedlungen die Flächeninhalte gegen die Siedlungsumfänge aufgetragen. Dies ist eine Möglichkeit, um die Kompaktheit von Siedlungen zu erfassen. Die einzelnen Siedlungen werden in der Abbildung mit dem Verhältnis von Flächeninhalt zu Umfang von geometrischen Figuren wie Kreis, Quadrat oder der Koch'schen Schneeflocke verglichen.

**Abbildung 3.15:** Verhältnis von Umfang und Fläche europäischer Siedlungen


Die rechte Darstellung unterscheidet sich von der linken nur insofern, als dass die extremsten Ausreißer hinsichtlich des Flächeninhaltes entfernt wurden. Sie zeigt damit einen Ausschnitt der linken Abbildung. Da sehr viele Siedlungen existieren, verzerrt die Grafik die Daten. Es ist jedoch ersichtlich, dass es durchaus Siedlungen bzw. Siedlungsverflechtungen gibt, die ein viel extremeres Verhältnis vom Umfang zur Fläche haben, als die angegebenen Vergleichsformen. Der Kreis wird dabei als kompakteste Form angesehen. Die Bezeichnung Koch steht dabei für das bekannte Fraktal der Kochschen Schneeflocke (Koch 3 bezeichnet die „*dritte*“ Schneeflocke - diese ist in Abbildung 3.16 mit  $A_2$  bezeichnet). Abbildung 3.16 veranschaulicht die Schneeflocke in ihren ersten Iterationsschritten.

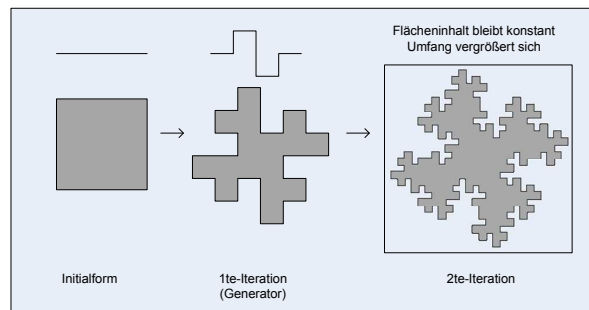
**Abbildung 3.16:** Entwicklungsprozess der Kochschen Schneeflocke


Ein weiteres Fraktal, das zur Beschreibung von Siedlungen herangezogen werden kann, ist das Teragon<sup>50</sup> (vgl. Abb. 3.17). In Abbildung 3.17 ist die Generierung der Teragonkurve

<sup>50</sup>Teragon, auch Monsterkurve, wird allgemein auch für andere Kurven verwendet (z.B. Peano-Kurve).

veranschaulicht. Wenn als Initialform anstatt einer Strecke z.B. ein Quadrat verwendet wird, so ist die sich ergebende Teragonkurve auch geschlossen. Mit jeder Iteration entstehen feinere Kurvenausbuchtungen. Solche Ausbuchtungen können bei Siedlungen unter verschiedenen Maßstäben beobachtet werden (vgl. [58], Frankhauser). Dieses Teragon hat die Eigenschaft, dass der eingeschlossene Flächeninhalt konstant bleibt und sich nur die Kurvenlänge ändert. Es kann mittels eines Lindenmayer-Systems (L-System) durch die Anwendung einer einzelnen Produktionsregel erzeugt werden. Mit fortschreitender Iteration steigt der mittlere Abstand zum Zentrum weniger an, als der mittlere Abstand zum Stadtrand sinkt. Somit wird ein Grund in der Zersiedlung darin gesehen, dass die schlechtere Erreichbarkeit des Zentrums durch eine viel bessere Erreichbarkeit des Hinterlandes überkompensiert wird (vgl. [58], Frankhauser).

**Abbildung 3.17:** Entwicklungsprozess eines Teragons



Bei der Auswertung der europäischen Siedlungen zeigte sich, dass fast 38% der Siedlungen bzw. Siedlungsverflechtungen ein extremeres Verhältnis vom Umfang zur Fläche aufweisen als ein Teragon 1ter Iteration. Nahezu 1,8% sind sogar fraktaler als ein Teragon 2ter Iteration. Sehr wenige Siedlungsverflechtungen übersteigen sogar das Verhältnis eines Teragons 3ter bzw. sogar 4ter Iteration.

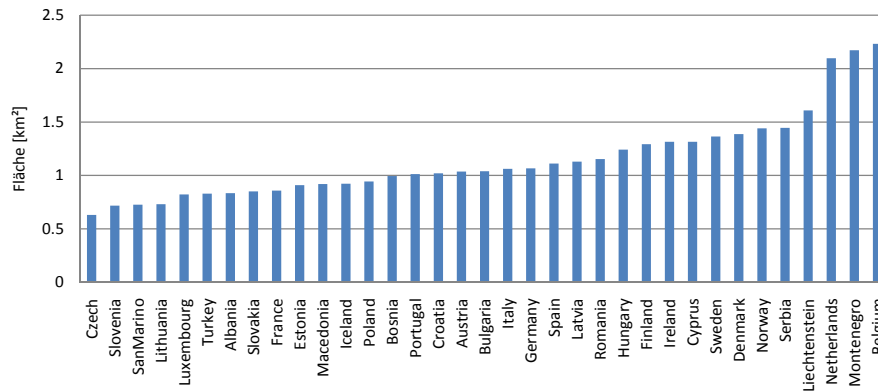
In der nachfolgenden Abbildung ist die durchschnittliche Größe <sup>51</sup> der Siedlungsflächen aller untersuchten europäischen Länder aufsteigend angegeben<sup>52</sup> (vgl. Abb. 3.18).

---

<sup>51</sup>Durchschnitt bezeichnet hierbei das arithmetische Mittel und nicht etwa den Median.

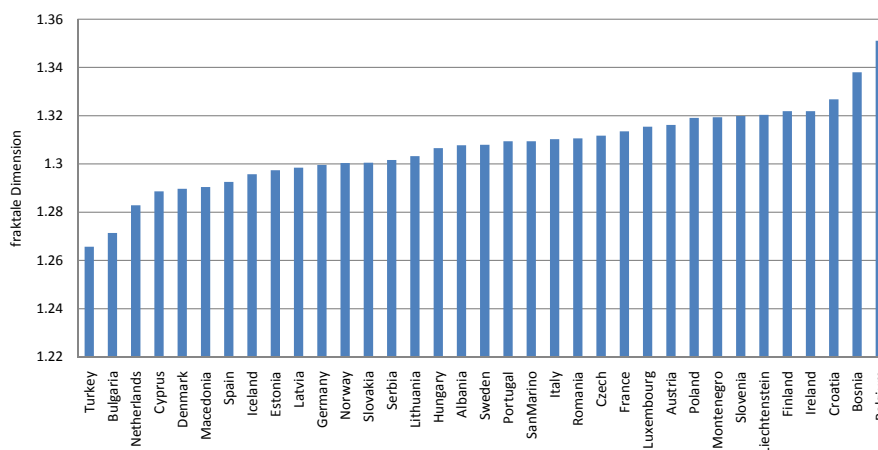
<sup>52</sup>Die Bezeichnung Bosnia steht für Bosnien und Herzegowina. Mazedonien ist gleichbedeutend mit Ehemalige Jugoslawische Republik Mazedonien.

**Abbildung 3.18:** Durchschnittliche Flächengröße aller Siedlungen



Belgien weist die höchste durchschnittliche Siedlungsgröße auf, was durch die Verflechtung und Zersiedlung großer Gebiete zu erklären ist. Die Siedlungsverflechtung spiegelt sich auch in den Abbildungen 3.19 und 3.20 wieder. In Abbildung 3.19 ist die mittlere fraktale Dimension bezogen auf alle Siedlungen pro Land angegeben.

**Abbildung 3.19:** Mittlere fraktale Dimension aller Siedlungsflächen

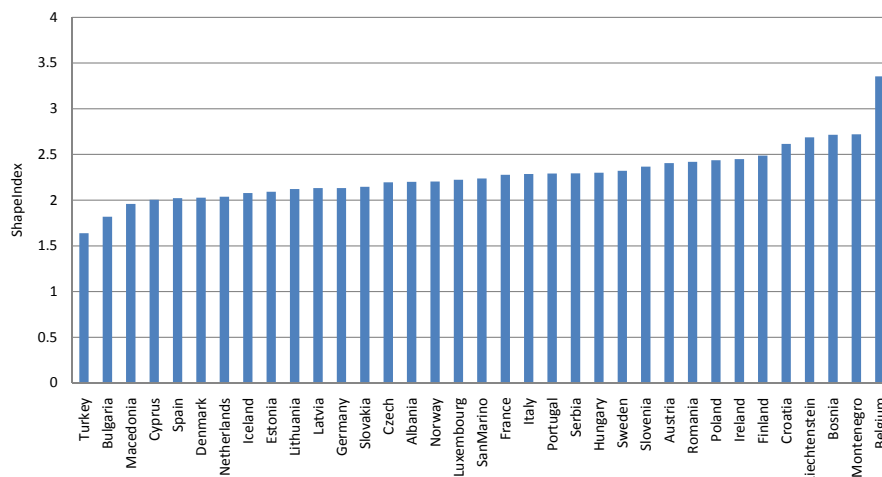


Die prinzipielle Bedeutung der fraktalen Geometrie auch für die Geographie wurde bereits 1983 von Arlinghaus betont (vgl. [4], Arlinghaus). Mit Hilfe der Fraktalität lassen sich Aussagen darüber ableiten, inwieweit städtebauliche Planung einen Einfluss auf Siedlungsformen hat (vgl. [58], Frankhauser). So findet beispielsweise das Konzept der Grüngürtel in Großbritannien verstärkt Anwendung um Zersiedlung entgegen zu wirken. Mit Hilfe der fraktalen Dimension konnte Frankhauser jedoch Zersiedlung jenseits der Grüngürtel nachweisen (vgl. [58], Frankhauser).

Die fraktale Dimension bewegt sich für die meisten der untersuchten europäischen Länder im Bereich von 1.28 bis 1.32. Je höher dabei die fraktale Dimension ist, desto weniger kompakt sind die Siedlungsbegrenzungen. Um eine räumliche Vorstellung zu ermöglichen, sind die fraktalen Dimensionen der Siedlungen beispielhaft für die Gebiete Irland, Sizilien, Finnland und die Türkei im Anhang mit Hilfe von Karten dargestellt (vgl. S. 171 ff.). Für Irland ist die Verteilung der Siedlungskompaktheit optisch nicht eindeutig einzuordnen. Im Fall von Sizilien sind vor allem die Küstengebiete von stärkerer Zersiedlung betroffen. Der rein optische Vergleich zwischen den Karten von Finnland und der Türkei lässt darauf schließen, dass die türkischen Siedlungen im Allgemeinen weniger zersiedelt sind als die finnischen. Für genauere Analysen der Zersiedlung müssten Methoden der Statistik/Geostatistik zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sollten die Messungen der Kompaktheit, wie angesprochen, mit Informationen wie der jeweiligen Planungspraxis betrachtet werden. Dieses war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich und bleibt somit weiterer Forschung überlassen. Die Interpretation, warum die Siedlungen der Türkei und Finnland hinsichtlich ihrer fraktalen Dimension optisch deutlich voneinander abweichen, bleibt somit im Rahmen dieser Arbeit offen. Eine mögliche Ursache könnten die Einstrahlungsverhältnisse in den jeweiligen Ländern sein. So könnte gewollte Verschattung ein Grund für die kompaktere Bauweise in der Türkei darstellen. In Finnland hingegen dürfte auf Grund seiner nördlichen Lage das Interesse bestehen, weiterer Verdunklung durch Verschattung entgegen zu wirken.

Die Darstellung der Kompaktheit europäischer Siedlungen durch Nutzung des ShapeIndexes ist in Abbildung 3.20 dargestellt.

**Abbildung 3.20:** Durchschnittliche Kompaktheit aller Siedlungsflächen



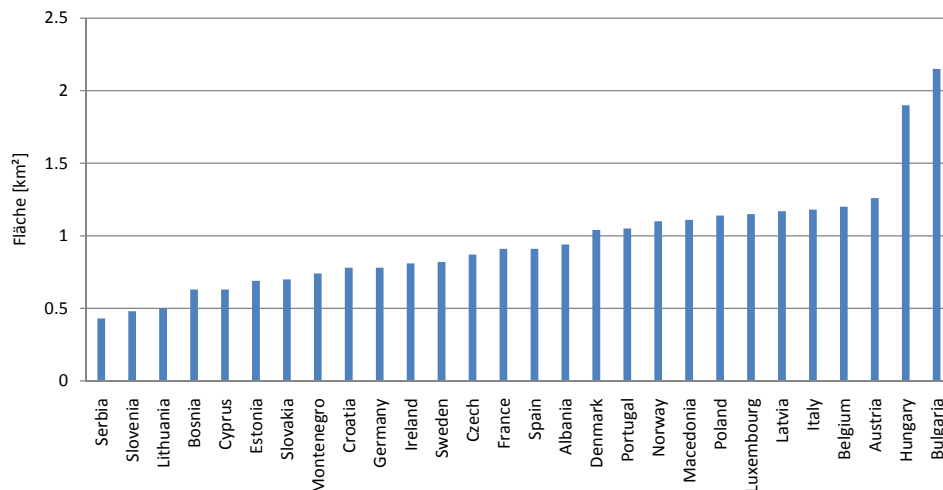


Die kompaktesten Siedlungen sind, wie auch durch die Analyse der fraktalen Dimension bestimmt, in der Türkei und in Bulgarien zu finden. Die größte Zersiedlung weist Belgien auf. Der Vergleich der beiden Kompaktheitsindikatoren ShapeIndex und fraktale Dimension zeigt, dass acht Länder in Bezug auf die Indikatoren den gleichen Rang haben. In 60% der Fälle treten weniger als 3 Rangdifferenzen auf. Der absolut größte Rangunterschied von neun Plätzen ist für die Tschechoslowakei zu verzeichnen. Die süd-europäischen Länder Portugal, Spanien und Italien besitzen bezüglich der Indikatoren ähnliche Ränge. Eine geographische Häufung der Rangunterschiede konnte jedoch nicht festgestellt werden. So beträgt die Rangdifferenz des nordeuropäischen Landes Dänemark z.B. einen Rang, wohingegen sich beide Indikatoren für Schweden um sechs Ränge unterscheiden.

### 3.6.4 Auswertung der Continous Urban Fabric

Im vorherigen Abschnitt wurden die Siedlungen hinsichtlich ihrer Bebauungsdichte nicht unterteilt. Da diese Zusammenfassung einen prinzipiellen Informationsverlust darstellt, werden in diesem Abschnitt die dichter bebauten Siedlungen separat betrachtet. Es folgen die zu den vorangegangenen Abbildungen äquivalenten Darstellungen, also Abbildungen zur mittleren Siedlungsgröße, zur mittleren fraktalen Dimension und zur Kompaktheit in Form des ShapeIndex (vgl. Abbildungen 3.21 3.22 und 3.23).

**Abbildung 3.21:** Durchschnittliche Flächengröße dicht bebauter Siedlungen

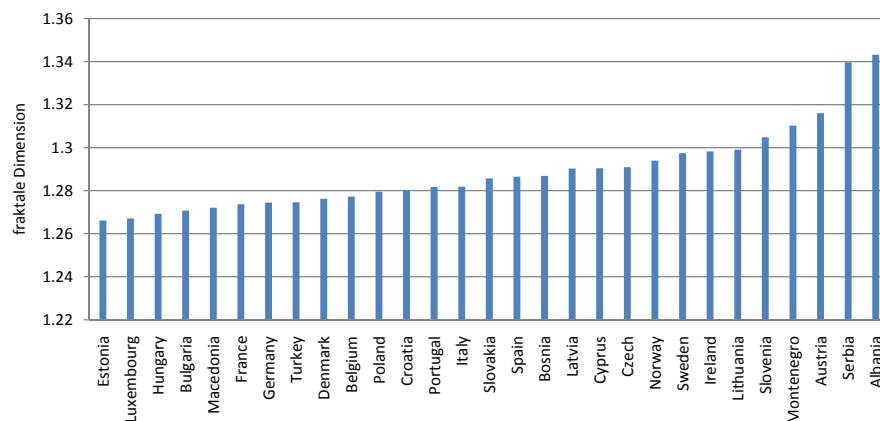


Die Continous Flächen wurden für die Länder nur unzureichend erfasst, so dass ihre

Aussagekraft begrenzt ist. So besitzen Finnland, Island, Lichtenstein, Malta, die Niederlande und Rumänien nach den CLC Daten keine Continuous Flächen. Dies ist mit Sicherheit realitätsfern. In Albanien existieren nur 3 dichter bebaute Flächen, wobei die Hauptstadt Tirana nicht dazu gehört. Für Mazedonien und Montenegro wird jeweils nur eine Continuous Fläche ausgewiesen. Demnach können maximal die großen Länder miteinander verglichen werden. Die durchschnittliche Größe der Continuous Flächen der Türkei beträgt als Ausreißer mehr als  $6km^2$ .

In Abbildung 3.22 ist die mittlere fraktale Dimension der dichter bebauten Siedlungsflächen für einzelne europäische Länder abgebildet. Mittlere Dimension bedeutet, dass der arithmetische Mittelwert über alle betreffenden Siedlungen berechnet wurde.

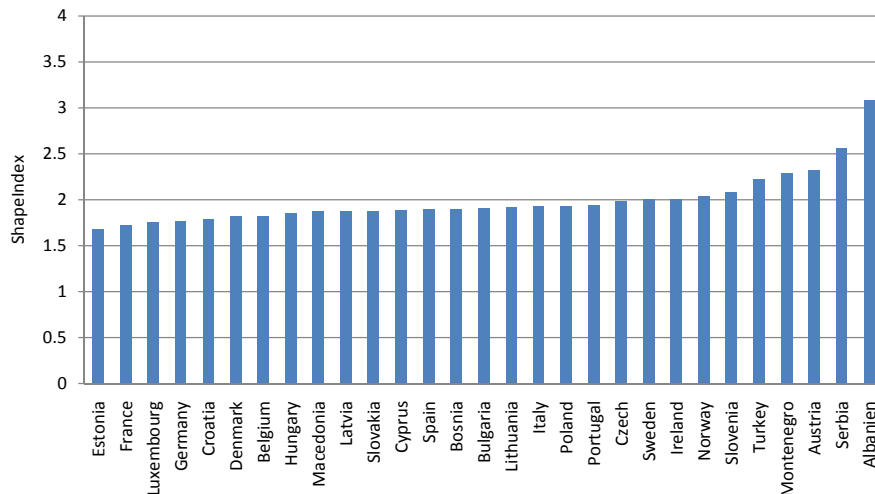
**Abbildung 3.22:** Mittlere fraktale Dimension dicht bebauter Siedlungsflächen



Insgesamt ist ersichtlich, dass die fraktalen Dimensionen geringer als bei der Betrachtung der zusammengefassten Siedlungen ausfallen (vgl. Abb. 3.19). Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass historisch ältere Siedlungskerne häufig dichter bebaute Fläche sind. Eine Ausnahme stellt die Türkei dar, da hier die fraktale Dimension dichter bebauter Siedlungen höher ist als im Vergleichsfall. Die fraktale Dimension der dichter bebauten Siedlungsflächen Deutschlands und Frankreichs ist anders als bei der Nichtunterscheidung der Bebauungsdichte nahezu gleich (vgl. Abb. 3.19).

In Anlehnung an das vorherige Kapitel wird in der nachfolgenden Abbildung 3.23 die Kompaktheit von Siedlungen mit Hilfe des ShapeIndexes erfasst.

**Abbildung 3.23:** Kompaktheit dicht bebauter Siedlungsflächen



Im Vergleich zu Abbildung 3.20, welche die ShapeIndices ohne Unterscheidung der Siedlungsdichte darstellt, ergeben sich deutliche Unterschiede. So sind die dicht bebauten Siedlungen der Türkei im europäischen Vergleich als sehr wenig kompakt anzusehen, wohingegen bei der Betrachtung ohne Unterscheidung der Bebauungsdichte die größte Kompaktheit für türkische Siedlungen bestimmt wurde. Im Gegensatz dazu sind die dicht bebauten Siedlungen in Frankreich sehr kompakt.

Im folgenden Abschnitt wird kurz auf die Ranggröße von Siedlungen eingegangen. Es wurde dabei der Versuch unternommen CLC Daten für die Ranggrößenregel zu nutzen.

### 3.6.5 Ranggrößenregel

Die Ranggrößenregel besagt, dass die Größe einer Stadt von Rang  $i$  durch den funktionalen Zusammenhang  $S_i = \frac{k}{i}$  geschätzt werden kann, wobei  $k$  eine Konstante ist. Demnach ist z.B. die zweitgrößte Stadt halb so groß wie die größte Stadt eines Landes. Als Größe der Stadt wird entsprechend Zipfs law die Einwohnerzahl herangezogen (Zipfs law von 1949 besagt  $P_r = \frac{P_1}{r}$ , wobei  $P_r$  die Einwohnerzahl der  $r$ -größten Stadt ist).

Da bei den vorliegenden Daten nur geometrische Aspekte eine Rolle spielen, wurde als Maß für die Größe einer Stadt in Abwandlung zu Zipf der Flächeninhalt herangezogen. Die Ranggrößenregel wurde beispielhaft für die im letzten Abschnitt betrachteten Länder (Deutschland, Polen, Frankreich, Rumänien, Schweden, Spanien) untersucht. Dabei

wurden die jeweils 20 größten Städte betrachtet. Die hierfür zu Grunde liegenden Daten sind auf Seite 170 im Anhang zu finden. In die Diagramme wurde eine an die Daten gut angepasste Potenzfunktion ( $f(x) = \alpha * x^\beta$ ) hineingelegt. Das Bestimmtheitsmaß der Trendfunktion wurde in Excel mittels eines transformierten Regressionsmodells berechnet<sup>53</sup>. Im Anschluss wurde  $\alpha = 1$  gesetzt, so dass nur noch  $\beta$  optimiert werden muss (diese resultierende Trendfunktion hat eine ähnliche formale Form zur speziellen Hyperbel  $f(x) = \frac{1}{x}$ ). Die Optimierung wählt  $\beta$  so, dass das Bestimmtheitsmaß (berechnet über logarithmierte Trendfunktion) maximal wird. Auf Grund der Einfachheit der Funktion (streng monoton) ist ein optimales  $\beta$  zu erwarten. Dieser Wert wurde durch den Excel-Solver bestimmt. Die  $\beta$  Werte mit korrespondierenden Bestimmtheitsmaßen sind nachfolgend aufgelistet.

**Tabelle 3.7:** Schätzwerte für Trendfunktion (Ranggrößen)

Deutschland	$\beta = -0.803$	$R^2 = 0.950$
Polen	$\beta = -0.427$	$R^2 = 0.925$
Frankreich	$\beta = -1.01$	$R^2 = 0.920$
Rumänien	$\beta = -0.759$	$R^2 = 0.728$
Schweden	$\beta = -0.456$	$R^2 = 0.968$
Spanien	$\beta = -0.820$	$R^2 = 0.930$

Die Größen von Siedlungen (Einwohner) können auch durch andere Herangehensweisen geschätzt werden (vgl. z.B. [57], Fonseca). Als Modell kann die mathematische Formulierung einer logarithmischen Spirale dienen (vgl. Abb. 3.24).

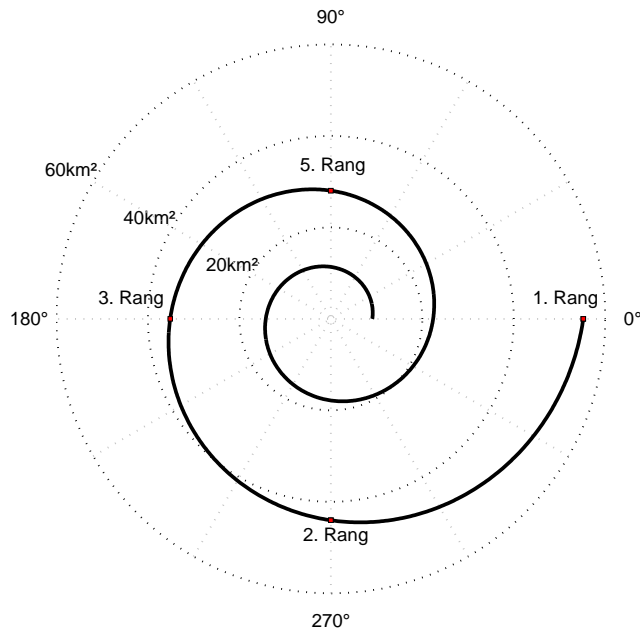
$$r = a * e^{\theta * \cot(\alpha)}$$

Fonseca untersuchte dies anhand amerikanischer Städte. Im Folgenden wurde diese Herangehensweise nur für die größten Siedlungen in Schweden auf Basis der CORINE Daten nachvollzogen. Anstelle der Populationen wurden Siedlungsgrößen betrachtet.

---

<sup>53</sup>Quelle: <http://office.microsoft.com/de-de/help/gleichungen-zum-berechnen-von-trendlinien-HP005207807.aspx?CTT=3>

**Abbildung 3.24:** Zusammenhang zwischen Ranggrößen und logarithmischen Spiralen



Im 90 Grad Abstand befinden sich die Siedlungen mit einer Ranggröße, die aufsteigend aus der Fibonacci-Folge (beginnend bei  $f_2$ ) bestimmt wurde<sup>54</sup>.

Theta durchläuft den gewünschten Winkelbereich. Die Konstante  $a$  wurde so bestimmt, dass die Spirale die größte Siedlung genau trifft. Alpha entspricht einem festen Winkel (in diesem Fall ca. 80 Grad). Ein optimales<sup>55</sup> Alpha kann z.B. mit dem Excel Solver bestimmt werden.

**Tabelle 3.8:** Flächenschätzwerte durch logarithmische Spirale

Siedlungsrang	CORINE-Wert	Spirale-Wert
1	55.17	55.17
2	46.76	44.02
3	36.14	35.19
5	27.24	28.01

<sup>54</sup>Fibonacci-Folge:  $f_0 = 0, f_1 = 1, f_2 = 1, f_3 = 2, f_4 = 3, f_5 = 5, f_6 = 8, f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$

<sup>55</sup>Optimal bedeutet hier, dass die durch die Spirale bestimmten Werte bestmöglich den gemessenen Werten entsprechen.

Es ist erkennbar, dass zumindest diese wenigen Siedlungsgrößen durch das Spiralmodell gut wiedergegeben werden können. Es sei hier einschränkend noch einmal betont, dass die Siedlungsflächen keinen administrativen Gebietseinheiten entsprechen. Auch lässt sich anhand dieses einen Beispiels nicht sagen, wie gut Flächengrößen generell der Ranggrößenregel folgen. Angemerkt sei weiterhin, dass Fonseca die Bevölkerung der Städte mit Hilfe des goldenen Schnittes<sup>56</sup> prognostiziert (vgl. [57], Fonseca).

Dieses Kapitel behandelte das Thema urbane Formen in Europa. Es konnte aufgezeigt werden, dass sich die Siedlungsformen innerhalb der betrachteten europäischen Länder deutlich voneinander unterscheiden. Wie in Kapitel 2 herausgearbeitet wurde, hat die Form von Siedlungen einerseits Auswirkungen auf die Möglichkeiten der Energieerzeugung als auch auf die Menge der nachgefragten Energie. Da vielfältige weitere Faktoren, wie z.B. Kosten, Technologien oder vorherrschende Witterungsbedingungen die Energieversorgung und -nachfrage beeinflussen, ist die Stärke des Zusammenhangs zwischen urbaner Form und Energienachfrage nicht trivial zu bestimmen. Die Kopplung einzelner beschriebener Formkenngrößen mit realen Energieverbrauchsdaten bleibt weiteren Forschungsarbeiten überlassen. Die hier erhobenen Siedlungsdaten liefern eine solide Grundlage für detaillierte Analysen.

Neben der Untersuchung von Siedlungsformen sind zeitliche Betrachtungen für energetische Fragestellungen, insbesondere für prognostische Energiebedarfsbestimmungen von Bedeutung. Dies betrifft den Wärme-, den Elektrizitäts- als auch den Verkehrssektor. Für die Wärmeversorgung ist im Haushaltsbereich insbesondere wichtig zu wissen, wann Bewohner zu Hause sind, da bestimmte Innentemperaturen auf Grund von Komfortansprüchen gewünscht werden. Bei der Betrachtung von Elektrizität ist darüber hinaus interessant, was die Menschen zu welcher Tageszeit tun, da verschiedene Aktivitäten mit unterschiedlichen Energiebedarfen einhergehen. Im Verkehrssektor ist vor allem von Bedeutung, wo Menschen ihre Zeit verbringen. In diesem Zusammenhang sind Distanzen für die Raumüberwindung zu beachten. Die Kenntnis darüber wo und wie lange sich Menschen an bestimmten Orten aufhalten, ist z.B. notwendig für die zukünftige Entwicklung einer Ladeinfrastruktur im Bereich der PKW Elektromobilität. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zeitliche Betrachtungen, insbesondere von Tagesabläufen, essentiell für vielfältige Fragestellungen im Bereich der Energieversorgung und Energienachfrage sind. Dem Thema Zeit wird daher der nun folgende zweite Teil dieser

---

<sup>56</sup>Der Goldene Schnitt kann auch über die Glieder der Fibonacci-Folge beliebig genau bestimmt werden (Grenzwertbetrachtung).

Arbeit gewidmet. Insbesondere die Betrachtung von Tagesaktivitäten durch die Nutzung vorhandener Zeitbudgetdaten wird in diesem Kapitel thematisiert.

## 4 Die Komponente Zeit für die Modellierung von Aktivitäten

In diesem Kapitel wird die Thematik Zeit und dabei insbesondere die Zeitnutzung betrachtet. Alle von Menschen ausgeführten Aktivitäten benötigen Zeit und können zu verschiedenen Zeiten stattfinden. Die Aktivitäten der Menschen beeinflussen wiederum den Energiebedarf. Das vorliegende Kapitel stellt somit grundlegende Informationen für die Simulation urbaner Aktivitäten, die in Kapitel 5.4 beschrieben wird, bereit. Dazu ist dieses Kapitel in drei Unterkapitel gegliedert. In Unterkapitel 4.1 wird auf die Thematik Zeitgeographie mit inhärenten Konzepten eingegangen. Sie bildet den Rahmen für die raum-zeitliche Analyse von Aktivitäten. Darauf folgt in Unterkapitel 4.2 eine Beschreibung der Zusammenhänge von Stadt und Zeit. Unterkapitel 4.3 ist der Nutzung von Zeitbudgetdaten gewidmet. Dabei werden Daten der in Deutschland erhobenen Zeitbudgetstudie 2001/2002 ausgewertet.

### 4.1 Zeitgeographie

Mit der Etablierung der eigenständigen Forschungsrichtung Zeitgeographie, die sich mit den räumlichen und zeitlichen Bedingungen des Handelns von Individuen beschäftigt, bekam die Dimension Zeit in den siebziger Jahren einen höheren Stellenwert innerhalb der Geographie. Beachtung fand die Dimension Zeit im Hinblick auf den Kontext dieser Arbeit jedoch schon vor der eigentlichen Herausbildung der Zeitgeographie (z.B. in den Arbeiten der Chicagoer Schule). Stadtentwicklungen wurden unter anderem durch den Zeitaspekt erklärt. Im Landnutzungsringmodell von J.G. Kohl (1841) wohnen die reicheren Bevölkerungsschichten im Stadtzentrum, wohingegen im Modell von Burgess (1924) sich die wohlhabendere Bevölkerung am Stadtrand ansiedelt. Die bevorzugte Ansiedlung am Stadtrand wird vor allem durch die zunehmende Mobilität, verbunden mit



der Technologie Straßenbahn sowie der Zunahme von Automobilen und somit durch den Faktor Zeit erklärt. Als Begründer der Zeitgeographie wird Hägerstrand angesehen, der in seiner Dissertation 1953 den Diffusionsprozess von Innovationen in Raum und Zeit in Mittelschweden beschreibt. Dass die Zeitgeographie auch heute ein relevantes Forschungsfeld ist, spiegelt sich z.B. bei Wegener wieder (vgl. [173], Wegener). Wegener zeigt, dass derzeitige Landnutzungsmodelle nur unzureichend auf Situationen wie verschwindende fossile Energieträger oder veränderte Klimabedingungen abgestimmt sind. Im Bereich der Modellierung sieht Wegener daher die Notwendigkeit von Veränderungen der den Modellen zugrundeliegenden Methodiken. Nach Wegener sind Nachteile heutiger Modelle unter anderem durch zu viel Extrapolation und zu viel Vertrauen auf bisher beobachtetes Verhalten gekennzeichnet. Der Aktionsraum, als Konzept der Zeitgeographie stellt für Wegener eine Möglichkeit dar, Mobilität unter den Aspekten Klimawandel, verringerte fossile Energieträger und steigende Kraftstoffpreise abzubilden. Der Begriff Aktionsraum beschreibt einen Raum, in dem festgelegte Gruppen entsprechend ihren Bedürfnissen und Wahrnehmungen innerhalb durch Aktionsweiten festgelegten Grenzen agieren. In diesem Zusammenhang sollte in zukünftigen Modellen weniger Gewicht auf vorhandene Möglichkeiten, stattdessen auf existente Beschränkungen gelegt werden (vgl. [173], Wegener). Beschränkungen und Visualisierungen im Bereich der Zeitgeographie werden nachfolgend beschrieben.

#### 4.1.1 Raum-Zeit-Beschränkungen

Der Zeitgeographie liegen generelle Annahmen bzw. Beschränkungen zu Grunde, die Hägerstrand 1975 formulierte (vgl. [98], Kramer). Eine dieser Annahmen ist, dass der Wechsel zwischen zwei Orten Zeit (ver)braucht. Neben diesen allgemeingültigen Annahmen werden in der Zeitgeographie 3 Klassen von Beschränkungen (constraints) unterschieden, die Aktivitäten in den verschiedenen Lebensbereichen beeinflussen.

- authority constraints
- capability constraints
- coupling constraints

Autoritätsbeschränkungen stellen Regeln und Gesetze, wie z.B. Ladenöffnungszeiten dar. Capabilities beschreiben die Möglichkeiten des Menschen. Diese sind durch die Grundbedürfnisbefriedigung, wie z.B. Essen und Schlafen, eingeschränkt. Kopplungsbeschrän-

kungen ergeben sich aus den Verpflichtungen gegenüber anderen. So ist der Schüler beispielsweise während gewisser Zeiten an den Ort Schule gebunden. Miller greift mit seinem Artikel *“What about people in Geographic Information Science?”*<sup>57</sup> die Ideen Hägerstrands auf und beschreibt deren Bedeutung angewendet auf die heutige Zeit (vgl. [112], Miller). Demnach ist eine zunehmende Fragmentierung zu beobachten, in der sich Menschen und Aktivitäten beispielsweise durch mobile Arbeitsplätze von Orten lösen. *“The increasing fragmentation of activity from space means that the assumption of strong structural correspondence between spatial and functional relationships at the basis of classical transportation and urban theory is increasingly untenable (Couclelis and Getis, 2000). Because of its place-based orientation, traditional transportation and urban theory is ill equipped to address many of the key questions regarding emerging lifestyles, urban form and differential access to activities and resources among social groups in the information age.”* (vgl. [112], Miller, S.218-219). Dies zeigt die Bedeutung von neuen bzw. erweiterten Forschungsansätzen.

#### 4.1.2 Konzept und Visualisierung

Alle Individuen befinden sich zu jeder Zeit an einem Ort. In Abhängigkeit der Zeit können den Individuen demnach räumliche Koordinaten zugeordnet werden. Aufgrund von Zeitbeschränkungen kann ein Individuum jedoch nur bestimmte Räume erreichen. Die potentiell erreichbaren Aktionsräume bzw. konkret aufgesuchte Räume (z.B. erfasst durch GPS-Track Daten) können dabei folgendermaßen erfasst und visualisiert werden:

- Raum-Zeit-Prismen
- Aktionsräume (Potential Path Areas - PPAs)
- Zeitpfade

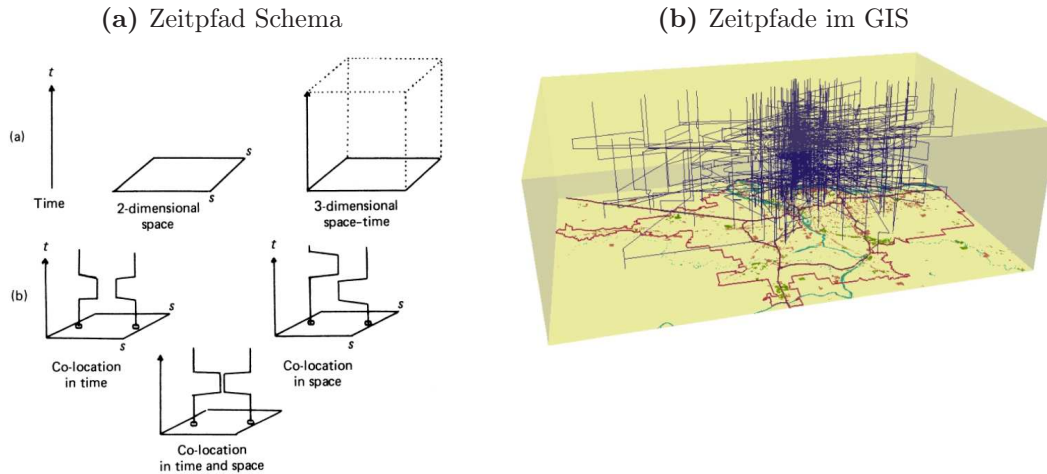
Aktionsräume sind Projektionen der “Prismen“ in die Ebene, also die Gebiete, die potentiell zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichbar sind. Aktionsräume sind somit abstrahiert Kreise. In der Realität nehmen die Aktionsräume diffuse Formen an und können durch Chronomaps veranschaulicht werden. Zeitpfade sind eine geographische Visualisierung von konkret aufgesuchten Räumen. Sie stellen die räumliche Lageveränderung

---

<sup>57</sup>Der Titel ist eine Homage an Hägerstrand. Dieser veröffentlichte seine Ideen u.a. unter dem Titel *“What about people in regional science”*.

im Laufe der Zeit dar, indem die Höhenlage im Raum (z-Koordinaten) durch die Zeit ersetzt wird. Die Anschaulichkeit dieser Visualisierung trug zur schnellen Verbreitung des zeitgeographischen Ansatzes bei (vgl. [98], Kramer).

**Abbildung 4.1:** Visualisierung von Zeitpfaden



Quelle : [100], Kwan, 2004

Wie in Abbildung 4.1a ersichtlich ist, kann das Aufsuchen eines Ortes durch Personen (Co-location in space) aber z.B. auch ein "Treffen" von Personen (Co-location in time and space) visualisiert werden. Abbildung 4.1b, auch als Space Time Aquarium bezeichnet, zeigt, dass diese Visualisierungsform schnell an ihre Grenzen stößt. Eine Auswertung und Visualisierung von Zeitpfaddaten basiert zumeist auf individuell programmierten Lösungen und ist somit nicht einfach zu realisieren<sup>58</sup>.

Zeitpfade wurden z.B. von Pohl für die Analyse von Stadtteilen ausgewertet (vgl. [126], Pohl). Zeitgeographie wird von Pohl als Bindeglied zwischen Mensch und Raum angesehen. Er verweist allerdings darauf, dass Motive für das Aufsuchen von Orten in der Zeitgeographie unberücksichtigt bleiben und neben den *Constraints* Handlungsoptionen existieren, die durch sozial-räumliche Rahmenbedingungen beeinflusst werden. Ziel seiner Analysen ist es, raumstrukturelle Disparitäten aufzuzeigen. Mit Hilfe der Aggregation von Zeitpfaden gelingt die Verbindung vom Individuum hin zur Gesellschaft (Mikro-Makro-Link) als auch die Verbindung von sozialem Handeln und Raum (Mensch-Raum-Link). Der Forschungsansatz von Pohl, der auf einem geokodierten Wegedatensatz beruht, lässt sich durch die Anwendung individuenbasierter Simulation ergänzen. Die Abbildung indi-

<sup>58</sup>Für ArcGIS 9.3 gibt es eine frei zugängliche Zeitgeographie Erweiterung im Netz, zu finden unter <http://web.utk.edu/~sshaw/NSF-Project-Website/download.htm>

vidueller Handlungen (Aktivitäten) durch Simulationen wird in Kapitel 5 dieser Arbeit aufgegriffen. Zunächst soll jedoch die von Pohl beschriebene Verbindung von Stadt und Zeit näher beschrieben werden.

## 4.2 Stadt und Zeit

„Die Uhr bedeutet Handlungen, Unternehmungen, Bewegungen und Inangriffnahme von Geschäften: Alles nämlich, was die Menschen tun, vollbringen sie im Hinblick auf die Stunden (Artemidor von Dalis - Traumbuch III - 2.Jh. n. Chr.)“ (vgl. [43], Dohrn-van Rossum, S.28)<sup>59</sup>. Vor dem 14. Jahrhundert war die Zeiteinteilung der Menschen hauptsächlich durch zyklisch wiederkehrende Phänomene geprägt<sup>60</sup>. Danach wandelte sich die Zeitauffassung<sup>61</sup> von einer zyklischen hin zu einer linearen Auffassung von Zeit. Mit der Einführung von öffentlichen Uhren wurden die Märkte organisatorisch weiter ausdifferenziert. Dohrn-van Rossum spricht in diesem Zusammenhang von der linearen kostbaren Zeit des Kaufmanns (vgl. [43], Dohrn-van Rossum).

Der Faktor Zeit hat für die alltäglichen Abläufe eine überragende Bedeutung. Hierbei ist der Begriff Zeit sehr vielschichtig zu verstehen und wird von verschiedensten Autoren auch im Plural gebraucht. Nach Helbrecht können mindestens fünf Formen von Zeit, die sich überlagern, unterschieden werden (vgl. [72], Helbrecht). Die Formen der Zeit nach Helbrecht sind nachfolgend aufgeführt:

- Uhrzeit
- Psychologische Zeit
- Naturzeit
- Geschichte
- Gesellschaftliche Zeit

---

<sup>59</sup>Das angesprochene Zitat ist prognostisch zu verstehen. Der Begriff Stunde ist der derzeitigen Auffassung nicht gleich.

<sup>60</sup>Zur zyklischen Zeit zählen durch Naturgesetze verursachte wiederkehrende Phänomene, wie beispielsweise jährliche Überschwemmungen, Gezeiten, der Tag-Nacht-Rhythmus oder die Jahreszeiten. Aber auch Zeiten, wie sie zum Beispiel durch das Kirchenjahr vorgegeben sind.

<sup>61</sup>Frühe Beschreibungen über das Phänomen Zeit finden sich z.B. in der Bibel (Prediger Kapitel 3) oder auch in den Bekenntnissen des Augustinus (Elftes Buch). Salomo beschreibt, dass alles seine Zeit hat. Augustinus erkennt in der Zeit eine Dreiheit. Umschrieben wird diese mit den Begriffen Erinnerung, Augenschein und Gegenwart. Des Weiteren widmet er sich dem Wesen und dem Messen von Zeit und den damit verbundenen Rätseln.

Städte als Motoren der Entwicklung weisen eine hohe Dynamik auf. Dies impliziert die Bedeutung des Faktors Zeit. Die von Helbrecht beschriebenen Ausprägungen der Zeit sollten bei Simulationen von Aktivitäten der Individuen Beachtung finden. Die Uhrzeit ist dabei am leichtesten erfassbar. Sie wird z.B. innerhalb von Zeitbudgetstudien erhoben. Zur Naturzeit zählen z.B. die Jahreszeiten, aber auch der Wechsel von Tag und Nacht, der durch die Zeiten von Sonnenauf- und untergängen bestimmt ist. Neben dieser externen Naturzeit gibt es auch biologische Zeitrhythmen, die endogen bestimmt und individuell verschieden sind. Die Unterscheidung von Tag und Nacht wird durch die Bestimmung von Sonnenauf- und untergangszeiten in der in dieser Arbeit beschriebenen Simulation berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.4.7.3).

Unter gesellschaftliche Zeiten fallen z.B. Urlaubs- oder Schulzeiten. Diese Zeiten können sich hinsichtlich ihrer Dauer und Verteilung stark unterscheiden. Des Weiteren fallen beispielsweise Ladenöffnungszeiten hierunter. Diese sind implizit in die Simulation eingebunden, so dass die Agenten z.B. nicht zu jeder Tageszeit einkaufen können. An dieser Stelle kann das Modell angepasst werden, so dass z.B. verschiedene Ladenöffnungszeiten simuliert werden können.

Die psychologische Zeit spiegelt die individuelle Zeiterfahrung wider. Zehn Minuten sind nicht gleich zehn Minuten. Die Zeitwahrnehmung hängt davon ab, wie diese Zeit verbracht und interpretiert wird. Langweiliges kann von Kurzweiligem unterschieden werden. Die psychologische Zeit ist nicht messbar. Wegen der schweren Erfassbarkeit wird sie in der Modellierung nicht weiter berücksichtigt. Es ist jedoch klar, dass die psychologische Zeitauffassung eine aus Erfahrung resultierende Erwartungshaltung erzeugt. Demnach beeinflusst die psychologische Zeit die Gestaltung individueller Tagesabläufe, da bestimmte Aktivitäten aufgrund der Erwartungshaltung bevorzugt oder auch gar nicht ausgeführt werden.

Die Geschichte umfasst von den bisher genannten Zeiten die längsten Zeitabschnitte. Sie kann von einigen Jahren bis hin zu Jahrhunderten reichen. Zieht man den Begriff Geschichte auch für kurze Zeithorizonte heran, so besitzt jeder Mensch seine eigene individuelle Geschichte (Biographie). Hier gibt es Überschneidungen zum psychologischen Zeitbegriff. Wie die psychologische Zeitauffassung, so hat auch die individuelle Geschichte, dass heißt die über Jahre gesammelten Erfahrungen mit Zeit, Auswirkung auf zukünftige Entscheidungen. Umfassendere Zeithorizonte, die über die menschliche Lebenszeit hinausgehen, hinterlassen ihre Wirkung auch in den Städten. So lässt sich städtische Architektur nach Epochen (z.B. Gotik, Renaissance, . . . ) unterscheiden. Neben

diesen physischen Hinterlassenschaften der Zeit werden jedoch auch Traditionen, Sitten, Gebräuche oder Werte weitergegeben. Somit hat auch Geschichte als der umfassendste der Zeitbegriffe seinen Einfluss auf das Leben der Gegenwart. Eberling weist explizit darauf hin, dass jede Gesellschaft ihre Zeitstrukturen, aber auch Methoden der Zeitsynchronisation hat (vgl. [46], Eberling). Gesellschaftliche Übergänge, wie die von der Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft oder von der Dienstleistungs- zur Informations- und Wissensgesellschaft gehen mit veränderten Zeitstrukturen einher.

Derzeit ändern und entwickeln sich Informations- und Kommunikationstechnologien rasant, was mit vielfältigen auch noch unbekannten Folgen verknüpft ist. Im Bereich der Arbeitswelt ist eine Ausdifferenzierung an Beschäftigungsmodellen zu erkennen (z.B. freie Mitarbeiter, Zeitarbeit, Telearbeit ...). Die zukünftige Gesellschaft wird durch lebenslanges Lernen, Zersplitterung und Flexibilisierung geprägt sein. Globales und lokales Denken findet mehr und mehr parallel statt. Diese Veränderungen beziehen sich sowohl auf räumliche als auch auf zeitliche Aspekte. Am Beispiel der Stadt Bremen wurden die Effekte und Konsequenzen wechselnder Zeitstrukturierung von Eberling untersucht (vgl. [46], Eberling). Die „Zeit“ hat Auswirkungen auf den Raum. So spricht Henkel davon, dass Zeit ein Qualitätsmerkmal von Flächen sein kann (vgl. [73], Henkel u. a.). Zeitliche Nutzungsdifferenzen oder auch Zugangsvorteile wie Nutzungsdauern bzw. Distanzempfindlichkeiten haben Einfluss auf die Standortwahl von Unternehmen. Bei Flächenknappheit kann die Fläche auch durch Zeit substituiert werden. Laut Henkel treten demnach aus Knappheits- bzw. ökologischen Gründen Überlegungen zu Zeiterweiterungen (z.B. Schichtarbeit) in den Vordergrund. Weiterhin gehen Arbeitsprozesse der Just-in-Time-Production mit einem kontinuierlichen Lieferverkehr einher. Dadurch wird insbesondere im produzierenden Gewerbe ein durchmischtes Wohnen und Arbeiten unmöglich oder erschwert. Somit hat auch im Gewerbe- und Industriesektor die Zeit einen Einfluss auf Standortnutzungen. Im nachfolgenden Abschnitt werden individuelle Zeitverwendungsstrukturen basierend auf Zeitbudgeterhebungen näher beschrieben.

## 4.3 Zeitverwendung

Die Allokation von Zeit durch Haushalte und deren Bedeutung für die Ökonomie wurde bereits in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts untersucht (vgl. [12], Becker). Becker argumentiert, dass durch den stetigen Rückgang der Arbeitszeit die Nichtarbeitszeit einen steigenden Anteil an der ökonomischen Wohlfahrt hat. Zeit kann durch Einkommen

in Güter konvertiert werden und Haushalte werden als Produzenten und Nutzenmaximierer betrachtet. Zeitbudgets geben dabei den Rahmen vor. Innerhalb ihres Zeitrahmens versuchen Haushalte demnach ihren Nutzen zu maximieren, der wiederum von Gütern und dem Faktor Zeit abhängt.

Um Aussagen über zukünftig zu erwartende Veränderungen, wie die Energiebedarfsentwicklung, abzuleiten, ist es von Bedeutung die Tagesgestaltung der Menschen zu verstehen. Hier ist es von Interesse zu analysieren, wie viel Zeit die Menschen mit welchen Tätigkeiten verbringen. Mit diesen Fragen beschäftigt sich die Zeitbudgetforschung. Datenerhebungen zur Zeitverwendung finden seit einigen Jahren regelmäßig in vielen Ländern statt, insbesondere in Staaten die zur OECD gehören. Eine Auflistung internationaler Zeitbudgeterhebungen der letzten Jahre ist u.a. bei Merz (vgl. [111], Merz) zu finden.

Im wiedervereinigten Deutschland gab es bisher zwei größere deutschlandweite Zeitbudgetstudien, die 1991/1992 bzw. 2001/2002 durchgeführt wurden. Das statistische Bundesamt gibt Veröffentlichungen zu diesen Studien heraus. Diese Studien sind eine wichtige Quelle zur Beantwortung der Fragen: Wofür verwenden wir unsere Zeit und wie verändert sich die Zeitinvestition in den verschiedenen Lebensbereichen? Für diese Arbeit lagen die Daten der Zeitbudgetstudie aus dem Jahr 2001/2002 vor. Die Studie wird auf Grund ihrer inhaltlichen Bedeutung für die Analyse von Aktivitäten im nächsten Abschnitt näher vorgestellt.

### **4.3.1 Zeitbudgetstudie 2001/2002**

Die Zeitbudgeterhebung von 2001/2002 wurde vom BFSFJ (Bundesministeriums für Familie, Senioren, Frauen und Jugend) in Auftrag gegeben und vom Statistischen Bundesamt in Kooperation mit den Statistischen Ämtern der Länder durchgeführt. In dieser Studie wurden mehr als 5000 Haushalte in denen über 13500 Personen leben befragt. Die Stichprobenauswahl erfolgte mit Hilfe des Quotenverfahrens.

In der Erhebung werden die Aktivitäten der Studienteilnehmer in ihrer Abfolge und Zeitdauer erfasst. Darüber hinaus werden verschiedene Merkmale erhoben, die die durchgeführten Aktivitäten beeinflussen und den befragten Personen selbst bzw. den Haushalten der betreffenden Personen zugeordnet werden können. Die Zeitbudgetstudie ist so angelegt, dass eine prinzipielle Vergleichbarkeit zur Vorgängerstudie (1991/1992) als auch mit anderen Zeitbudget-Studien der Europäischen Union gewährleistet werden kann.



Im Sinne der Datenharmonisierung wurde die Zeitnutzung 10 minütig getaktet (die allgemeine Vorgehensweise bei Zeitbudgetuntersuchungen ist, um die europäische Vergleichbarkeit zu gewährleisten, in den *Guidelines on harmonized European Time Use surveys* beschrieben). Methodisch erfolgte die Zeitverwendungserfassung durch selbstgeführte Tagebuchaufzeichnungen. Dadurch wird das ganze Spektrum von Tätigkeiten der Befragungsteilnehmer erfasst. Durch diese Methodik werden die Unzulänglichkeiten anderer Erhebungsmethoden, wie die der aktivitätsorientierten Zeiterfassung oder die Nachteile von nachträglichen Interviews reduziert bzw. ganz vermieden<sup>62</sup>. Das komplette Erhebungsdesign der Zeitbudgetstudie mit seinen Vorteilen gegenüber alternativen Methoden ist durch Ehling beschrieben (vgl. [47], Ehling u. a.).

Die folgende Tabelle zeigt, wie vielfältig die Tätigkeitsbereiche sind, mit denen Personen ihre Zeit verbringen (vgl. Tabelle 4.1). Die Hauptklassifikation der Aktivitäten in der Zeitbudgetstudie von 2001/2002 unterscheidet sich dabei von der Studie aus dem Jahr 1991/1992.

**Tabelle 4.1:** Klassifikation der Aktivitäten in der Zeitbudgetstudie 2001/2002

0	Persönlicher Bereich/Physiologische Regeneration
1	Erwerbstätigkeit
2	Qualifikation/Bildung
3	Haushaltsführung und Betreuung der Familie
4	Ehrenamtliche Tätigkeiten, Freiwilligenarbeit
5	Soziales Leben und Unterhaltung
6	Teilnahme an sportlichen Aktivitäten
7	Hobbys und Spiele
8	Massenmedien
9	Wegezeiten und unbestimmte Zeitverwendung

Die Abgrenzung und somit die Klassifizierung von Tätigkeitsbereichen ist schwierig. Auf Grund der Vielzahl an ausgeübten Beschäftigungen ist eine Gruppierung jedoch notwendig. So dient Sport der körperlichen Fitness, ist zumeist ein Hobby und hat zumindest im Mannschaftsportbereich eine soziale Komponente. Daneben dient Sport im Profibereich dem Erwerb. Insofern ist eine Einteilung immer problematisch, da die Lebensbereiche nicht in disjunkte Kategorien gebracht werden können. Daher ist die Auswertung der Daten auch nicht unproblematisch. So zeigt sich, dass Frauen oft mehr Zeit für den

<sup>62</sup>Nachteile bei der Zeiterfassung mit Hilfe von Interviews über zurückliegende Zeiträume sind ungenauere Zeitangaben, sowie dass oftmals die Zeitangaben als Summe nicht 24h ergeben. Bei der aktivitätsorientierten Zeiterfassung werden dagegen nur ausgewählte Tätigkeiten betrachtet.



sozialen Austausch investieren. Zu beachten ist aber, dass sich die Zeit für soziale Kontakte bei Männern z.B. hinter Kategorien wie Sport verbergen kann. Die Vielfalt der Zeitnutzungen sowie Analysen von Nutzungen bestimmter Gruppen (Männer, ältere Menschen,...) für die Zeitbudgetstudie sind umfassend in der Veröffentlichung „*Alltag in Deutschland*“ (vgl. [152], Statistisches Bundesamt) beschrieben.

Neben der Aufzeichnung von Tagesaktivitäten besteht die Zeitbudgetstudie 2001/2002 aus einem Personen- und einem Haushaltsfragebogen. Diese drei Teile der Studie werden nachfolgend detaillierter betrachtet, um das Nutzenpotential dieser Daten für die im nachfolgenden Kapitel 5 beschriebene Simulation zu verdeutlichen.

#### 4.3.1.1 Tagesaktivitätenfragebogen

Der Fragebogen über die Tagesaktivitäten ist der zentrale Bestandteil der Zeitbudgetstudie. Alle Mitglieder eines teilnehmenden Haushaltes, älter als 10 Jahre, waren aufgefordert, ein Tagebuch auszufüllen. Ziel des Tagesaktivitätenfragebogens ist die gesamtzeitliche Erfassung einzelner Haushaltstätigkeiten sowie die Erfassung von Arbeitsteilung im Haushalt. Pro Person werden drei Tage erfasst, wobei ein Wochenendtag und zwei Tage unter der Woche enthalten sein müssen. Um eine Vergleichbarkeit innerhalb der einzelnen Haushalte zu gewährleisten, füllen die Haushaltsmitglieder die gleichen Tage aus. Tätigkeiten werden mit einer Mindestdauer von 10 Minuten<sup>63</sup> erhoben, wobei zu den Tätigkeiten sowohl körperliche als auch geistige Beschäftigungen zählen. Weiterhin können die teilnehmenden Haushaltsmitglieder eine Haupttätigkeit und eine möglicherweise gleichzeitig stattfindende weitere Aktivität (Nebenaktivität) eintragen. Die Haupt- und Nebenaktivitäten als auch der Ort bzw. die Verkehrsmittel sind im offenen Format anzugeben. Den Befragten waren somit keine Antwortkategorien vorgegeben. Ob die Aktivitäten alleine ausgeführt oder Zeitabschnitte mit anderen Personen<sup>64</sup> verbracht wurden, ist ein weiteres Anliegen der Fragebogenerfassung. Der Wochentag, der Monat und das Jahr (2001 bzw. 2002) des Ausfülltages wurde ebenfalls notiert. Abschließend sind im Erhebungsbogen Fragestellungen vorhanden, die weitergehende Informationen für die Fragebogenauswertung bereitstellen (z.B. Einschätzung der Befragten, ob der Ausfülltag

---

<sup>63</sup>Bei mehreren Tätigkeiten innerhalb eines 10 Minuten Zeitraumes wird die Tätigkeit mit der längsten Zeitdauer erhoben.

<sup>64</sup>Hierbei wird für jeden Zeitschritt unterschieden, ob Zeit zusammen verbracht wird: mit Kindern unter 10 Jahren, mit dem (Ehe)partner, mit anderen Haushaltsmitgliedern oder mit anderen bekannten Personen.

normal oder außergewöhnlich war sowie Information darüber, wann der Fragebogen ausgefüllt wurde oder auch die Information darüber, ob am Tag des Ausfüllens eine Reise unternommen wurde). Die in diesem Abschnitt gegebene Beschreibung des Tagesaktivitätenfragebogens entstammt direkt aus dem vom Statistischen Landesamt Bayern zur Verfügung gestellten Fragebogendatensatz, bzw. den Erklärungen, welche den Fragebögen beilagen. Insgesamt wurden mit diesem Fragebogen rund 35000 Tagesabläufe mit annähernd 1200 Variablen erfasst.

#### **4.3.1.2 Personenfragebogen**

Der Personenfragebogen als zweiter Bestandteil der Zeitbudgetstudie erfasst verschiedenste soziodemographische Merkmale, wie Lebensalter, Geschlecht, Staatsangehörigkeit oder auch den Familienstand. Weitere Fragestellungen widmen sich der Einschätzung der Zeitverwendung<sup>65</sup> als auch der Zufriedenheit mit der Zeitverwendung<sup>66</sup> für verschiedene Tätigkeitsbereiche. Ein großer Bereich behandelt die Themen Hilfe für Andere bzw. ehrenamtliche Tätigkeiten. Hierbei wurden die betreffenden Tätigkeitsbereiche und der dafür geschätzte wöchentliche Zeitbedarf abgefragt. Die Studienteilnehmer wurden darüber hinaus gebeten, ihren Gesundheitszustand einzuschätzen. Weitere Fragestellungen widmen sich den Themengebieten Bildungshintergrund, Aus-, Fort- und Weiterbildung sowie der Erwerbsbeteiligung und dem Einkommen. Insgesamt hat der Fragebogen nahezu 400 Variablen, die Anzahl der Datensätze beträgt mehr als 13500.

#### **4.3.1.3 Haushaltsfragebogen**

Abschließend gibt es für die Zeitbudgetstudie noch einen Fragebogen der die individuelle Ebene verlässt und die Ebene des Haushalts betrachtet. In diesem Fragebogen werden die Wohnverhältnisse (z.B. Art des Wohngebäudes, Wohnfläche, Anzahl verfügbarer Zimmer, Wohneigentum) und die Lebensverhältnisse untersucht. Lebensverhältnisse beschreiben in diesem Zusammenhang die bereitstehende Haushaltsausstattung. So wird z.B. die Anzahl von PCs, Fernsehern, Tiefkühltruhen und weiteren Geräten erfasst. Zusätzlich werden empfangene Hilfeleistungen des Haushalts (z.B. bei Kinderbetreuung oder Gartenarbeit) mit Zeitangabe erhoben. Auch die zu Fuß Erreichbarkeiten (z.B. zur Bibliothek oder zum nächstgelegenen Spielplatz) werden in der Studie abgefragt.

---

<sup>65</sup> Ausprägung der Variablen Zeitverwendung: zu wenig Zeit, genau die richtige Zeit, zu viel Zeit.

<sup>66</sup> Ausprägung der Variablen Zufriedenheit: sehr zufrieden, sehr unzufrieden, trifft nicht zu.

Weitere Fragekomplexe beschäftigen sich mit Haushaltseinkommensquellen (z.B. Sozialhilfe, Kindergeld etc.), dem Gesamthaushaltseinkommen als auch dem Haushaltstyp (z.B. alleinerziehend mit Kind unter 6 Jahren). Abschließend wird noch unterschieden, ob es sich um einen Haushalt in Ost- bzw. Westdeutschland handelt. Insgesamt hat der Fragebogen mehr als 100 Variablen, die Anzahl der Datensätze beträgt mehr als 5000.

### 4.3.2 Zeitverwendungsstudie - Datenauswertung

In diesem Abschnitt erfolgt eine Auswertung der Zeitbudgetstudie im Hinblick auf relevante Fragestellungen für die in Kapitel 5 beschriebene Modellierung. Für die Erforschung von Mobilität und Energiebedarf in Haushalten ist es zunächst wichtig zu wissen, wann die Menschen zu Hause bzw. unterwegs sind. Die Erfassung der Anzahl der Bewohner im Haushalt in Abhängigkeit von der Tageszeit ist ebenso bedeutsam und stellt bei Richardson et. al. die Grundlage für die Simulation von Elektrizitätsnachfragen in diesem Sektor dar (vgl. [134], Richardson u. a. und [135], Richardson u. a.). Das von Richardson et. al. entwickelte *occupancy model* steht im Internet frei zur Verfügung, so dass es für eigene Zwecke in neue Modelle eingebettet werden kann und darf (vgl. [134], Richardson u. a.). Weiterhin ist es wichtig, die Anzahl, die Art als auch die Verteilung der Aktivitäten über den Tagesverlauf besser zu verstehen. Um Energiebedarfe prognostizieren zu können, ist es unabdingbar diese Einflussfaktoren in ihrer Bedeutung zu erfassen. Es stellt sich also die Frage, inwieweit diverse Merkmale (z.B. Geschlecht, Einkommen, soziales Milieu, Alter, ...) das Aktivitätenprogramm steuern und wie variabel Tagesabläufe gestaltet werden können. In den Abbildungen 4.2 und 4.3 ist das Verhältnis von außerhäuslichen Tätigkeiten<sup>67</sup> und Tätigkeiten im eigenen Wohnbereich während des Tagesverlaufes dargestellt.

#### 4.3.2.1 Verteilung der Außer-Haus-Aktivitäten

Wie durch die Einleitung zu diesem Abschnitt dargelegt wurde, ist es von Interesse zu wissen, wann die Menschen zu Hause sind bzw. wann sie Außer-Haus-Tätigkeiten durchführen. In diesem Zusammenhang ist das Verhältnis von innerhäuslichen zu außerhäuslichen Aktivitäten im Tagesverlauf von Bedeutung. In diesem Abschnitt wird der

---

<sup>67</sup>Hierbei wurden alle Tätigkeiten die nicht explizit als zu Hause deklariert wurden als außerhäuslich betrachtet. Hierunter fallen z.B. auch Aktivitäten, die in Zweitwohnungen bzw. Wochenendhäusern stattfinden.

Anteil der Außer-Haus-Aktivitäten in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren aus den Zeitbudgetdaten bestimmt.

Da für diese Auswertung zwei Datensätze (Tagesaktivitätendatensatz und Personendatensatz) in Beziehung gesetzt werden mussten, sei hierauf kurz eingegangen. Die Beziehung zwischen Daten wird in Datenbanken über Primär- und Fremdschlüssel hergestellt (dabei können 1:1, 1:m oder n:m Beziehungen auftreten). Da die Herstellung einer Beziehung (Verknüpfung) zwischen Daten für eine Datenauswahl in R sehr elegant umgesetzt werden kann, sei an dieser Stelle der R-Code zu dieser Thematik eingefügt. Die eindeutige Identifizierung eines Datensatzes ist über einen zusammengesetzten Schlüssel aus Haushaltsnummer und Personennummer möglich.

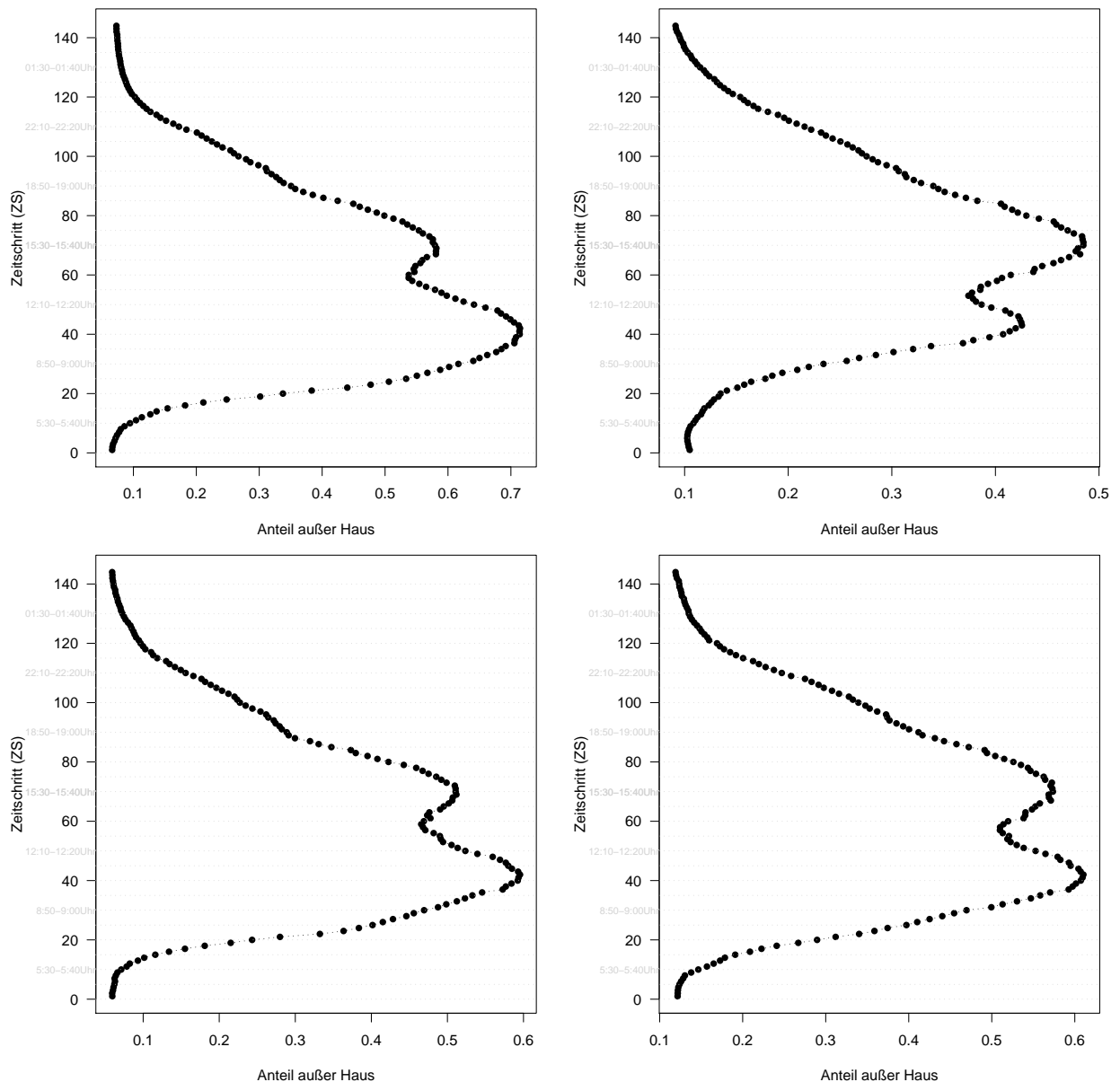
#### R-Code<sup>68</sup>

```
gewuenschte_Spalte1<-Datensatz1[[Spaltenindex]];
Auswahl1<-grep("Suchwort1",gewuenschte_Spalte1);
ID_Prim<-as.numeric(paste(Datensatz1[[Spalte_x]],Datensatz1[[Spalte_y]],sep=""));
ID_Fremd<-as.numeric(paste(Datensatz2[[Spalte_x]],Datensatz2[[Spalte_y]],sep=""));
matching<-match(ID_Prim,ID_Fremd);
...
```

In Abbildung 4.2 ist der Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten für die Unterscheidung zwischen Woche und Wochenende als auch zwischen Sommer und Winter zu sehen. Auf der Y-Achse ist die Tageszeit in Form von Zeitschritten aufgetragen. Da die Tagebuchaufzeichnung eine 10 minütige Einteilung besitzt, ergeben sich pro Tag 144 Zeitschritte. Der erste Zeitschritt beginnt nach den Daten der Tagebuchaufzeichnung um 4 Uhr Nachts.

<sup>68</sup>Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Funktion grep (zur Auswahl von Zeilen, die einem Kriterium entsprechen), die Funktion paste (zum Verketteten von strings) und die Funktion match(x,y) (zum Auffinden der Werte aus Vektor x im Vektor y).

Abbildung 4.2: Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten im Tagesverlauf (personenbezogen)



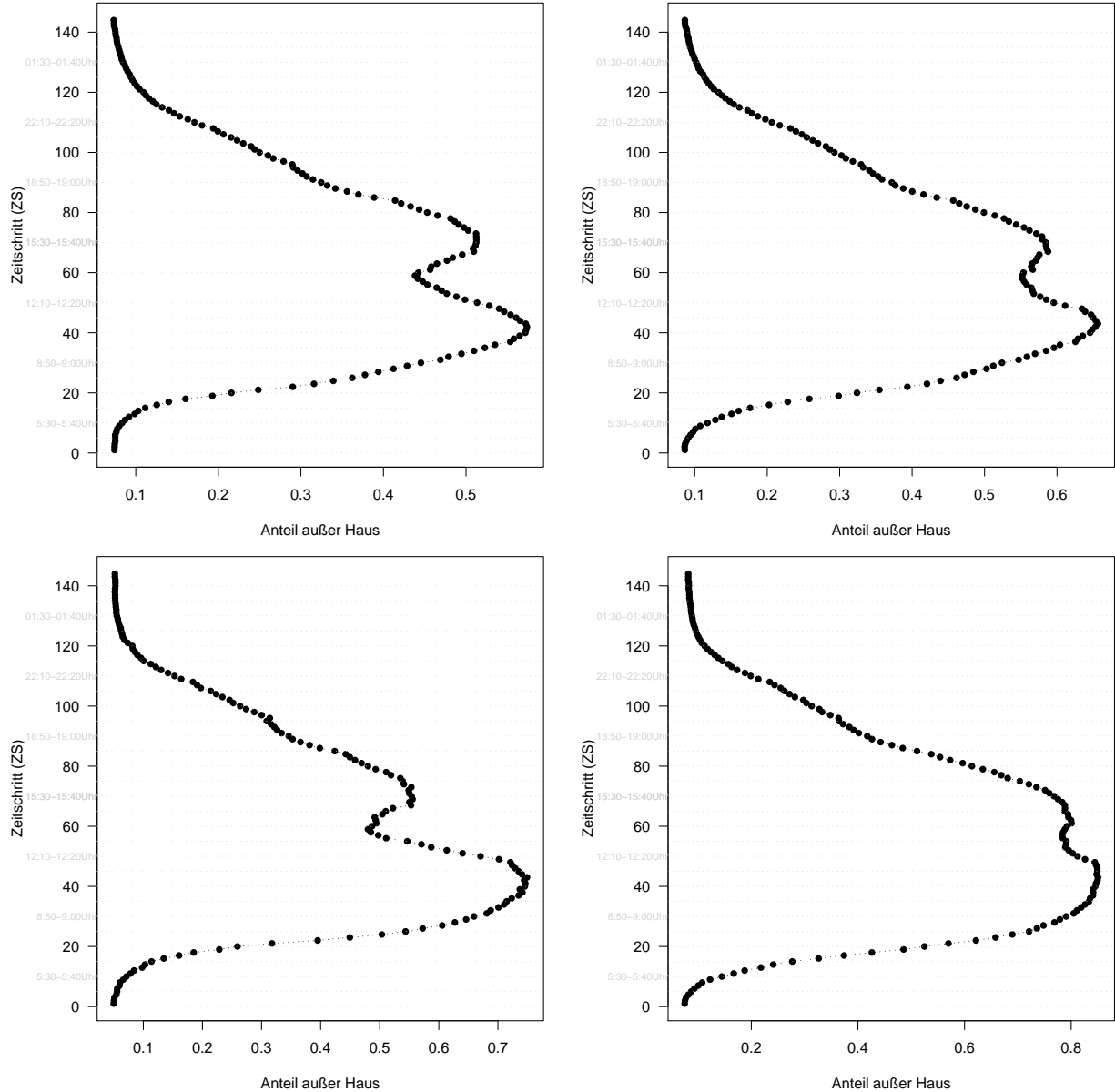
oben links: in der Woche, oben rechts: Wochenende, unten links: Winter (Januar, Februar), unten rechts: Sommer (Juli, August)

Für diese Auswertung wurden erst einmal alle Tagesdatensätze betrachtet. Dann wurden wie aus der Grafik ersichtlich ist, die Daten hinsichtlich der Merkmale Jahreszeit und Wochentag eingeschränkt. Erkennbar<sup>69</sup> ist der Unterschied zwischen Wochentagen und Wochenenden, der sich vor allem darin äußert, dass der Peak der Außer-Haus-Aktivitäten

<sup>69</sup>Auf Grund der Ausnutzung des Platzes für die eigentliche Grafik weicht die Einteilung auf der x-Achse ab, was jedoch etwas zu Lasten der visuellen Vergleichbarkeit geht.

sich vom späten Vormittag in den Nachmittag hinein verschiebt. In den Sommermonaten finden, wie auf Grund der Temperatur- und Lichtverhältnisse zu erwarten ist, mehr Außer-Haus-Aktivitäten abends statt.

**Abbildung 4.3:** Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten im Tagesverlauf (zeitbezogen)



oben links: nur weibliche Personen, oben rechts: nur männliche Personen, unten links: teilzeitbeschäftigte Personen (Wochentags), unten rechts: vollzeitbeschäftigte Personen (Wochentags)

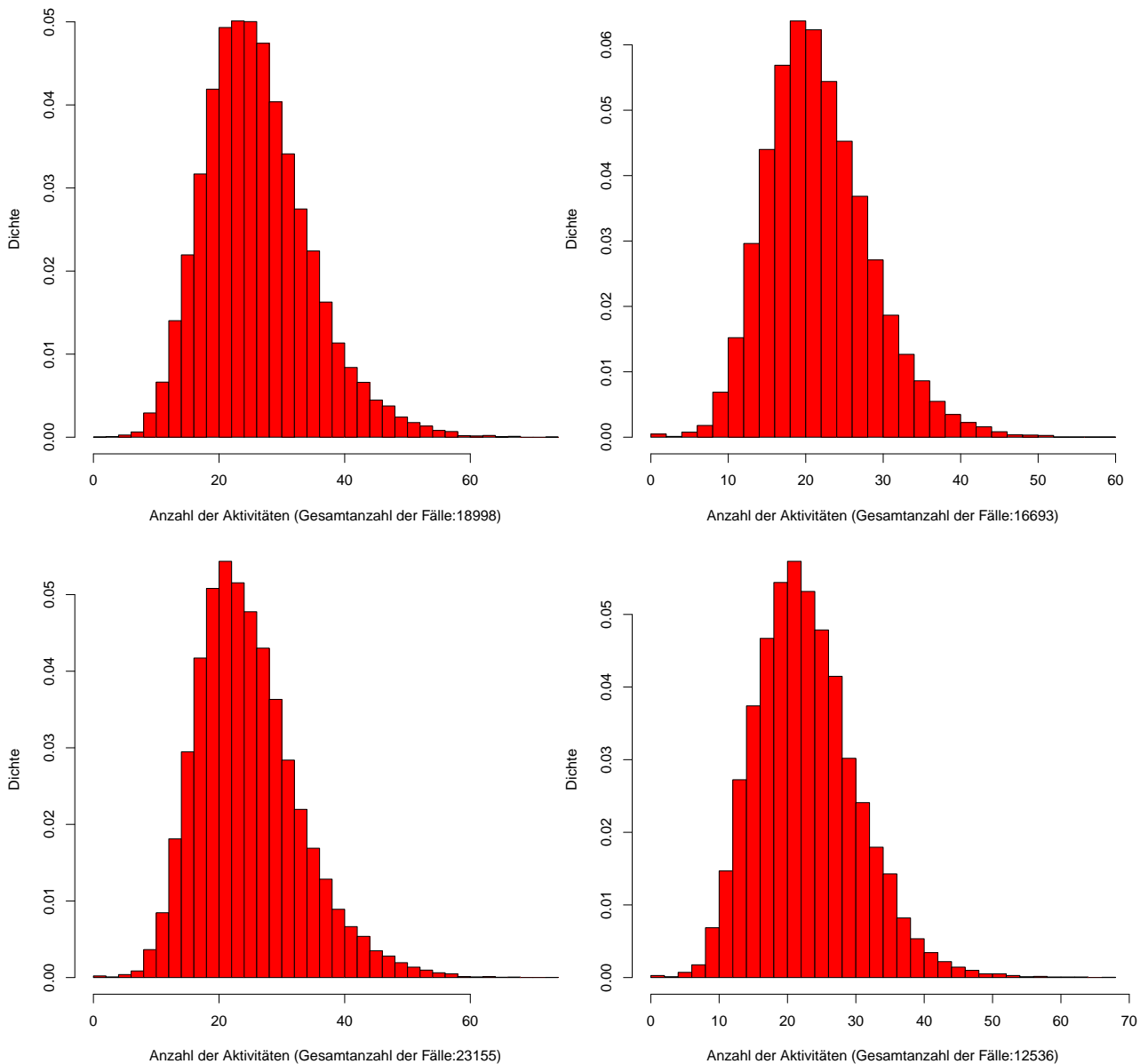
In Abbildung 4.3 ist der Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten für die Unterscheidung hinsichtlich des Merkmals Geschlecht als auch hinsichtlich des Merkmals Beschäftigung zu

sehen. Es zeigt sich, dass der Peak bei den Männern in der Graphik stärker ausgeprägt ist als bei den Frauen. Dies könnte durch traditionelle Frauenrollen bedingt sein. Auch der Einfluss der Vollbeschäftigung im Vergleich zur Teilzeitbeschäftigung spiegelt sich in der Abbildung wieder. So ist der Anteil der Außer-Haus-Tätigkeiten am Nachmittag bei den Vollbeschäftigten deutlich höher als bei der Vergleichsgruppe. Neben der Verteilung von häußlichen und außerhäuslichen Tätigkeiten muss die Anzahl der Tätigkeiten und deren Verteilung im Tagesverlauf bekannt sein. Diese Aspekte werden im anschließenden Abschnitt behandelt.

#### **4.3.2.2 Anzahl und Verteilung von Aktivitäten im Tagesverlauf**

Die Verteilung der Anzahl der Tagestätigkeiten in Abhängigkeit vom Geschlecht bzw. dem Wochentag ist in den folgenden Histogrammen dargestellt (vgl. 4.4).

Abbildung 4.4: Tätigkeitsanzahl nach Geschlecht und Wochentag

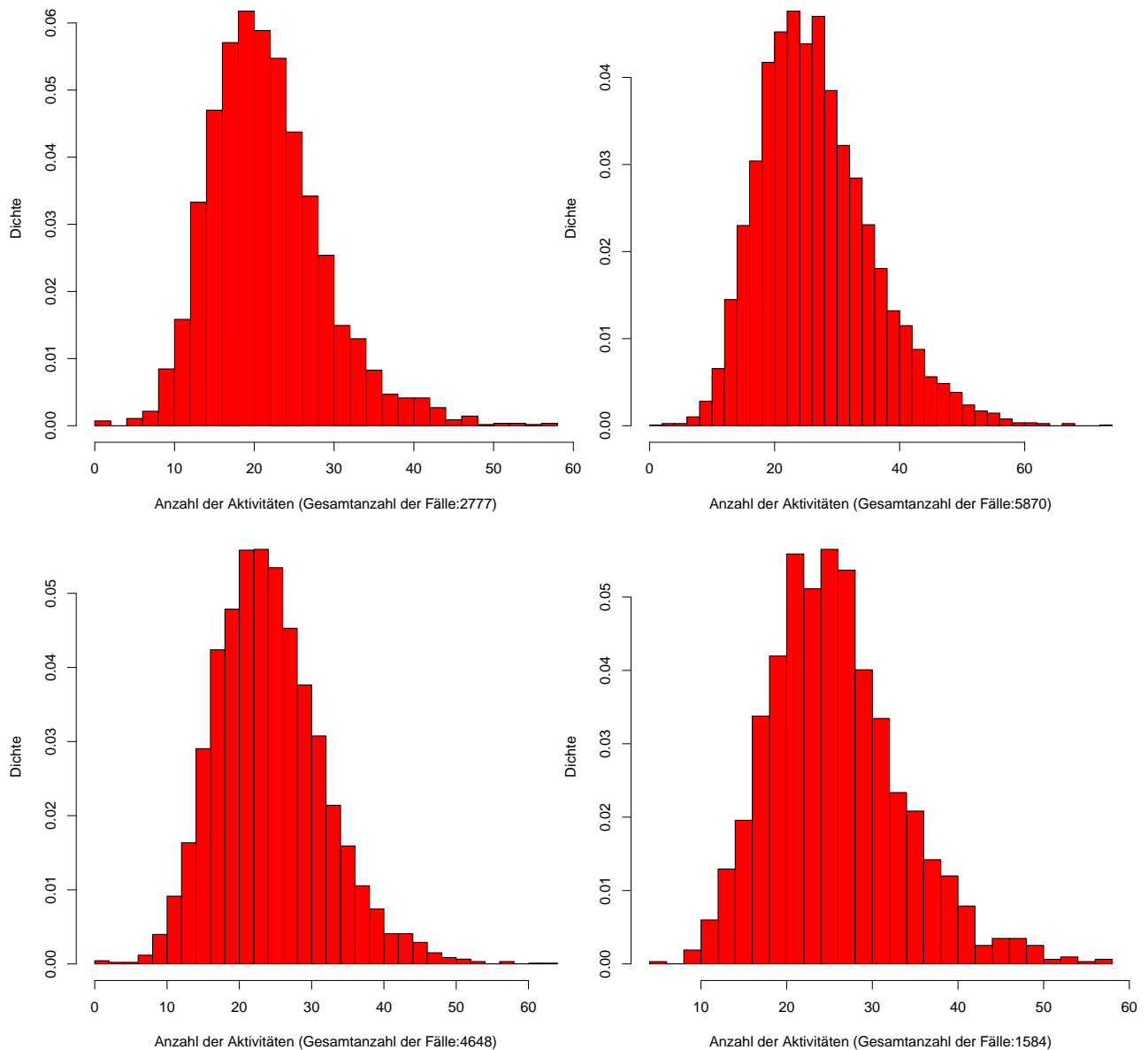


oben links: Daten (weibliche Personen), oben rechts: Daten (männliche Personen), unten links: Daten (Wochentags), unten rechts: Daten (Wochenende)

Anhand der obigen Histogramme kann nach augenscheinlicher Betrachtung davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Tätigkeiten unabhängig von den betrachteten Merkmalen ist. Auf genauere statistische Analysen wurde in diesem Zusammenhang verzichtet. Die nachfolgenden Histogramme stellen die Tätigkeitsanzahlverteilung in Abhängigkeit des Personenalters dar (vgl. Abb. 4.5).



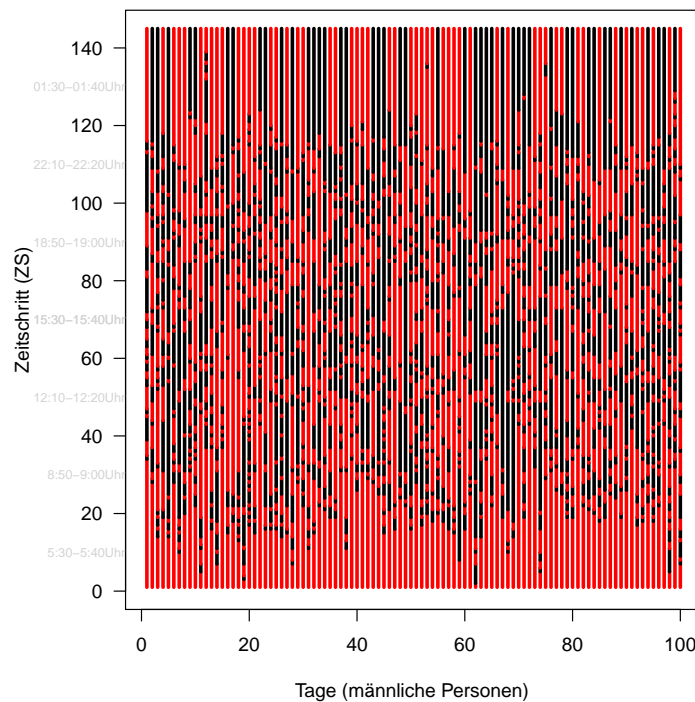
Abbildung 4.5: Tätigkeitsanzahl nach Altersklassen



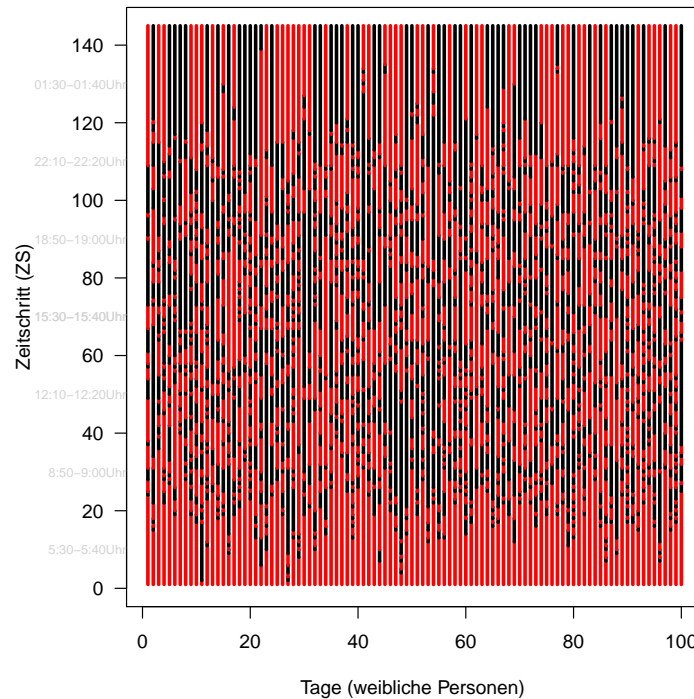
Es zeigt sich, dass das Alter durchaus einen Einfluß auf die Anzahl der Tagestätigkeiten hat. Die relative Klassenhäufigkeit kann mittels der Häufigkeitsdichte und der Klassenbreite berechnet werden. So ist z.B. aus den Histogrammen ersichtlich, dass eine hohe Tätigkeitsanzahl (z.B. der Bereich um 40 Tätigkeiten) prozentual am häufigsten in der Altersklasse der 30-39 Jährigen auftritt.

Die Verteilung von Aktivitäten im Tagesverlauf, also der Beginn, die Dauer, als auch die Anzahl von Aktivitäten ist in den nächsten beiden Abbildungen dargestellt (vgl. Abb. 4.6 und Abb. 4.7). Für die Visualisierung komplexer Tagesabläufe wird sich einer bereits von Ellegård und Cooper verwendeten Darstellungsform bedient (vgl. [48], Ellegård u. Cooper). Die Autoren stellen in ihrer Veröffentlichung verschiedene Möglichkeiten der Visualisierung von Tagesabläufen vor. Für die Abbildungen 4.6 und 4.7 wurden aus dem Gesamtdatensatz der Tagesabläufe per Zufall jeweils 100 beschriebene Tage für männliche bzw. weibliche Personen gezogen. Es ist sehr gut ersichtlich, wie diffus die Aktivitäten<sup>70</sup> im Tagesverlauf verteilt sind. Die Aktivitäten wurden hierbei abwechselnd farbig dargestellt, so dass die Summe der dargestellten Teilstücke die Gesamtanzahl der Tagesaktivitäten wiedergibt. Durch die Einbeziehung weiterer Merkmale (z.B. soziodemographische Merkmale, Wochentag, ...) ist es mitunter möglich, genauere Muster in der Ausgestaltung von Tagesabläufen zu erkennen.

**Abbildung 4.6:** Aktivitätsdauern im Tagesverlauf (männliche Personen)



<sup>70</sup>Bei den Aktivitäten handelt es sich um die angegebenen Hauptaktivitäten. Nebenaktivitäten wurden hier nicht betrachtet. Ein Wechsel in der Kodierung der Hauptaktivität wird als neue Aktivität angesehen.

**Abbildung 4.7:** Aktivitätsdauern im Tagesverlauf (weibliche Personen)

#### 4.3.2.3 Variabilität von Tagesabläufen

Betrachtet man Aktivitäten im Tagesverlauf, so ist eine wichtige Fragestellung die nach der Variabilität bzw. der Konstanz von Tagesabläufen. Inwieweit sind welche Aktivitäten wie verschiebbar und wie oft wird dies getan? Um Tagesabläufe hinsichtlich ihrer Variabilität zu vergleichen, kann aus inhaltlichen Gründen nicht der aus der Statistik bekannte klassische Korrelationskoeffizient verwendet werden. Ein Vergleich der Aktivitäten kann mit Hilfe von Methoden geschehen, die in der Linguistik zum Vergleich von Texten oder in der Genetik zum Vergleich von Nukleinsäure- (DNA, RNA) oder Aminosäureketten (Peptide, Proteine) benutzt werden. Der übergeordnete Begriff für diese Methoden lautet *pattern matching*. Tagesabläufe können in diesem Zusammenhang als Sequenz von Tätigkeiten aufgefasst werden. Eine Metrik<sup>71</sup> zum Vergleich zweier Sequenzen ist die Levenshtein-Metrik. Da die Tageseinteilung fest ist (144 Zeitschritte), kann die Hamming Distanz als Spezialfall der Levenshtein Metrik angewendet werden, um die Ähnlichkeit (Hamming-Ähnlichkeit) von Tagesabläufen zu berechnen. Die Hamming

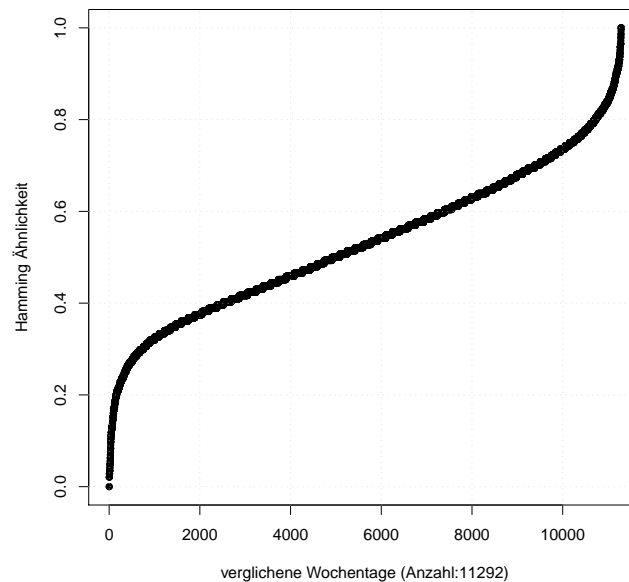
<sup>71</sup>Eine Metrik hat folgende Eigenschaften:  $d(x,y)=0 \Rightarrow x=y$ ,  $d(x,y)=d(y,x)$  (Symmetrie),  $d(x,y) \leq d(x,z)+d(z,y)$  (Dreiecksungleichung).

Distanz zwischen Sequenzen beschreibt die Anzahl an Operationen (Ersetzungen), die notwendig sind, um eine Sequenz in eine andere zu überführen. Die Hamming Distanz ist somit nicht tolerant gegenüber Verschiebungen.

$$\text{Hamming} - \text{Ähnlichkeit}(x, y) = 1 - \frac{\text{HammingDistanz}(x, y)}{\text{Sequenzlänge}} \quad (4.1)$$

Abbildung 4.8 zeigt in aufsteigender Reihenfolge alle Hamming-Ähnlichkeiten der Vergleichstage. Verglichen wurden Wochentage<sup>72</sup> von jeweils ein und derselben Person. Trotz der Einfachheit dieser Ähnlichkeitsmessung zeigt die Grafik, dass viele Tage einander relativ ähnlich sind. Dies kann auf Gewohnheiten (z.B. Schlafenszeiten) als auch auf von außen festgelegte Zeiten (z.B. Arbeitszeiten) zurückgeführt werden.

**Abbildung 4.8:** Aufsteigend sortierte Hamming-Ähnlichkeiten (Wochentage)



Eine weitere Möglichkeit die Ähnlichkeit zweier Sequenzen zu bestimmen, ist die Verwendung von N-Grammen. N-Gramme sind Folgen aus N Zeichen (so bestehen z.B. Bigramme aus 2 und Trigramme aus 3 Zeichen). Die Sequenzen können als Menge von N-Grammen dargestellt werden. Ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Sequenzen stellt hier der Dice-Koeffizient dar.

---

<sup>72</sup>Beeinflussungen wie Feiertag, Urlaubstag wurden nicht beachtet (es zählte nur Wochentag oder nicht Wochentag).

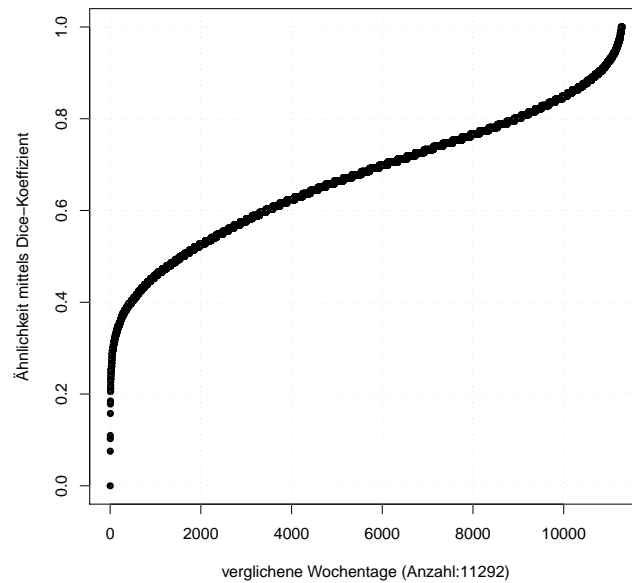
$$Dice(x, y) = \frac{2 * |N(x) \cap N(y)|}{|N(x)| + |N(y)|} \quad (4.2)$$

$N(x)$  und  $N(y)$  sind die Mengen der  $N$ -Gramme aus den Sequenzen  $x$  und  $y$ . Verschiebungen in den Sequenzen werden toleriert. Jedoch ist es unerheblich, wie oft gleiche Sequenzen auftreten. Auch die Verschiebungslängen werden nicht berücksichtigt<sup>73</sup>. Neben dem Dice-Koeffizienten und der Hamming-Ähnlichkeit gibt es weitere Verfahren, um Sequenzen miteinander zu vergleichen. So verwendete Rindsfuser im Bereich der Verkehrsnachfragemodellierung für die Daten des Projektes Mobidrive die Methode der Sequenz-Alignierung um Ähnlichkeiten zwischen Tagesabläufen zu erfassen (vgl. [136], Rindsfuser). Im Folgenden wurde im Vergleich zu den Hamming-Ähnlichkeiten für dieselben Daten die Dice-Koeffizienten berechnet (vgl. Abb. 4.9). Die Berechnungen erfolgten auf Basis von Trigrammen. Damit die Sequenzlänge gleich bleibt und die Berechnung des Dice-Koeffizienten nicht ungünstig beeinflusst wird, wurden die Daten umkodiert, so dass ein Zeichen einer Tätigkeit entspricht<sup>74</sup>. Da mehr als 250 Tätigkeiten unterschieden werden, reichen die Ascii Zeichen nicht aus, so dass Teile von Unicode verwendet wurden, um die Umkodierung durchzuführen. Aus Abbildung 4.9 ist ersichtlich, dass die Tagesaktivitäten im Vergleich zu den Hamming Distanzen deutlich ähnlicher erscheinen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Wahl verschiedener Metriken zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führt. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von Schlich, der verschiedene Distanzmaße zur Messung intrapersoneller Variabilität einsetzt (vgl. [144], Schlich).

---

<sup>73</sup>Die Einschränkung auf eine maximale Verschiebungslänge wäre in diesem Zusammenhang eine sinnvolle Erweiterung.

<sup>74</sup>Die Tagesaktivitäten wurden im Zeitbudgetdatensatz mit 2- bzw. 3-stelligen Zahlen kodiert.

**Abbildung 4.9:** Aufsteigend sortierte Dice-Koeffizienten (Wochentage)

Wie beschrieben, hat das Verständnis von Tagesabläufen mit den entsprechenden Tätigkeiten eine große Bedeutung für viele energetisch relevante Fragestellungen. Es ist jedoch nicht nur interessant, welche Tätigkeiten ausgeführt werden, sondern auch wo diese Tätigkeiten stattfinden. Innerhalb der Zeitbudgetstudien fand der räumliche Bezug wenig Berücksichtigung, so dass lediglich zwischen Aktivitäten im Haus oder außerhalb unterschieden werden konnte.

In diesem Sinn, stellt sich die Frage inwieweit Mobilitätsmuster von Menschen vorhergesagt werden können. Song et al. analysierten dazu Handydaten von 45000 anonymisierten Nutzern (vgl. [151], Song u. a.). Dabei wurden nur Nutzer berücksichtigt, die ein Minimum an Telefonaten und Ortswechseln überschritten. Der Untersuchungszeitraum betrug 3 Monate. Die mittlere Größe des Abdeckungsgebietes der Funkmasten lag bei durchschnittlich  $3\text{km}^2$ . Ein Ortswechsel fand demnach immer dann statt, wenn ein Handynutzer in den Abdeckungsbereich eines anderen Funkmastes wechselt. Im Ergebnis ermittelten Song et al., dass der Aufenthaltsort im Schnitt über alle Untersuchungspersonen zu über 90% vorhergesagt werden kann. Die Genauigkeit der Vorhersage von Aufenthaltsorten ist wiedererwartend weitgehend unabhängig vom Mobilitätsradius der Menschen. Das Ergebnis dieser Untersuchung spiegelt den Alltag wieder, der durch weniger zufällige Abweichungen bestimmt ist, als oft angenommen wird.

In diesem Kapitel wurden Konzepte der Zeitgeographie und die Verwendung von Zeitbudgetdaten vorgestellt. Im zweiten und dritten Kapitel stand mit der Thematik urbane Formen der Raum im Mittelpunkt der Betrachtung. Es ist allgemeiner Konsens, dass der Raum mit seiner Ausstattung einerseits und zeitliche Aspekte andererseits einen Einfluss auf die Tagesorganisation ausüben. Im letzten Kapitel soll daher der Versuch unternommen werden, eine Mikrosimulation über Tagesaktivitäten einer Stadtbevölkerung zu generieren. Dabei finden die angesprochenen Faktoren Raum und Zeit Berücksichtigung und die Tätigkeiten werden mit Energiebedarfen assoziiert, um unter anderem abzuschätzen, wie variabel Energiebedarfe sein können.

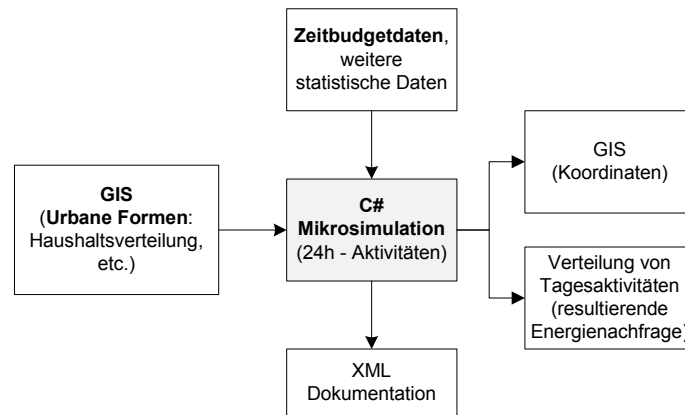
# 5 Mikrosimulation - Tagessimulation(24h) - Aktivitäten mit Energiebezug

In diesem Kapitel wird die Simulation von Tagesaktivitäten einer synthetischen Stadtbevölkerung vorgestellt. Die Tagesaktivitäten werden in dem Modell mit Energiebedarfen verknüpft. Das Ziel der Modellierung ist es, ein Werkzeug zu entwickeln, mit dem in Abhängigkeit sich ändernder Rahmenbedingungen eine räumlich und zeitlich aufgelöste Energienachfrage geschätzt werden kann. Das Verständnis komplexer Zusammenhänge kann mit Hilfe von Mikrosimulationen verbessert werden, so dass ein solches Modell perspektivisch zur Unterstützung planungsrelevanter Entscheidungen herangezogen werden kann.

Die Organisation urbaner Systeme kann nach Bretagnolle et al. auf 3 Hauptebenen beschrieben werden (vgl. [30], Bretagnolle u. a.). Diese Ebenen entsprechen einer Mikro-, Meso- bzw. Makrosicht auf das System. Da im Folgenden eine Tagessimulation auf der Ebene von Individuen durchgeführt wird, ist vorrangig die Mikroebene von Bedeutung. Nur diese Sichtweise wird im Weiteren beschrieben.

Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über die Modellierung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Simulation. Entscheidend ist hier, dass ein GIS lose mit einer sonst unabhängigen objektorientierten Programmierung für die Tagesaktivitätensimulation verbunden wird. Die Verknüpfung von GIS und Aktivitätensimulation kann unter den Begriff Spatial Decision Support Systems (SDSS) zusammengefasst werden. Das GIS dient dabei einerseits der indirekten Datenbereitstellung und andererseits als Visualisierungswerkzeug.



**Abbildung 5.1:** Mikrosimulation - Modellüberblick

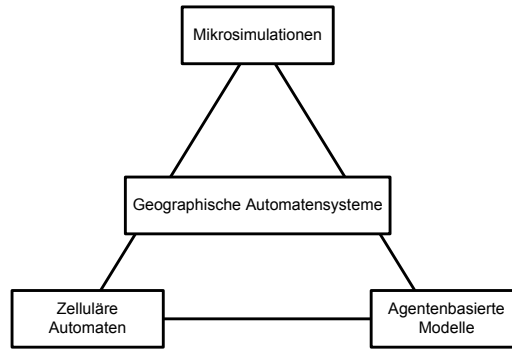
Bevor eine detaillierte Beschreibung des Modells erfolgt, werden die Möglichkeiten individuenbasierter Modellierung aufgezeigt (vgl. Kapitel 5.1). In Kapitel 5.2 werden aktivitätsbasierte Modelle sowie ihre Klassifikation beschrieben und es wird kurz auf mathematische Hintergründe eingegangen. Anschließend werden Faktoren dargestellt, die im Simulationskontext Aktivitäten und Energiebedarfe beeinflussen (vgl. Kapitel 5.3). Den Abschluss bildet Kapitel 5.4 mit der Beschreibung der Simulation und den Ergebnissen der Modellierung.

## 5.1 Individuenbasierte Modellierung

Eine individuenbasierte Modellierung, also der Versuch mit einem Bottom-up-Ansatz reale Vorgänge auf übergeordneter Ebene zu beschreiben, kann mittels verschiedener Techniken durchgeführt werden. Abbildung 5.2 stellt die drei Säulen der Modellierungsansätze dar.

Die drei Hauptrichtungen der individuenbasierten Modellierung sind demnach die Verwendung von zellulären Automaten, Multiagentensysteme sowie Mikrosimulationen. Ein zellulärer Automat kann als Menge von parallelen endlichen Moore-Automaten aufgefasst werden und kann z.B. zur Simulation von Landnutzungsänderungen herangezogen werden. Zelluläre Automaten haben durch die Zellenlage und die gegebene Nachbarschaftsdefinition einen räumlichen Bezug. Ein Nachteil von zellulären Automaten besteht jedoch darin, dass die Zellen fix sind und somit manche Phänomene, wie der

**Abbildung 5.2:** Säulen der individuenbasierten Modellierung



Umzug innerhalb einer Siedlung (Ortswechsel), nicht abgebildet werden können. Multiagentensysteme werden vordergründig für soziale bzw. wirtschaftliche Fragestellungen eingesetzt. Der Raum spielt hier zumeist keine oder nur eine untergeordnete Rolle.

Ein Geographisches Automatenystem, als eine weitere Möglichkeit urbane Systeme zu modellieren, stellt den Versuch dar, die Vorteile von zellulären Automaten mit den Vorteilen von Agentensystemen zu kombinieren bzw. deren Schwächen in Bezug auf geographische Fragestellungen zu beheben. Ein Geographisches Automatenystem, bestehend aus vielen Automaten wird hierbei wie folgt als 7-tupel definiert (vgl. [15], Benenson u. Torrens).

$$G \sim (K, S, T_s, L, M_L, N, R_N)$$

$K$  ist hierbei die Menge der modellierten Objekte,  $S$  die Menge der Zustände ( $S^k \subseteq S, k \in K$ ),  $T_s$  ist die Menge der Transitionen,  $L$  gibt den Ort und  $N$  die jeweilige Nachbarschaft an.  $M_L$  und  $R_N$  legen die Orts- und Nachbarschaftsveränderungen fest. Eine Umsetzung der geographischen Automatentheorie erfolgte unter anderem in dem mittlerweile eingestellten Projekt *Object-Based Environment for Urban Simulation* (OBEUS).

Koch sieht in der Geosimulation eine Möglichkeit theorieinduzierte Ansprüche methodisch umzusetzen, da die Entstehung sozialer als auch räumlicher Systeme abgebildet werden kann, Re-Konstruktionen möglich sind und über Kommunikation eine Verbindung zwischen räumlichen und sozialem System besteht (vgl. [92] u. [93], Koch). Im Zusammenhang mit Geosimulationen wird auch oft der Begriff *Geographical-Aware Intelligent Agents* (GAIA) verwendet.

Da in der hier durchgeführten Simulation Nachbarschaftsbeziehungen nicht berücksichtigt werden, ist das vorliegende Modell dem Bereich der Mikrosimulation zuzuordnen.

Mikrosimulationen basieren auf kleinen Einheiten (Personen, Firmen, Autos, ...) die mit Eigenschaften und einer Menge von Regeln, die den stochastischen oder festen Zustandsübergang festlegen, ausgestattet sind. Im Unterschied zur vorliegenden Simulation betrachten Mikrosimulationen jedoch oft längere Zeiträume und werden vorrangig eingesetzt, um den Einfluss von fiskalischen Entscheidungen im Zusammenhang mit demographischen Entwicklungen auf soziale Gerechtigkeit zu untersuchen.

Der Unterschied des in dieser Arbeit erstellten Modells zu einem Multi-Agenten-Modell ergibt sich aus den Eigenschaften von Agentenmodellen. Agenten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie ihre Umwelt wahrnehmen und darauf reagieren. Des Weiteren können sie aktiv handeln, sind lernfähig, agieren autonom und stehen mit anderen Agenten in Beziehung (Kommunikation). Ihr autonomes Handeln ist auf ein Ziel ausgerichtet. Dieses Ziel ist demnach die Voraussetzung und Grundlage des Handelns der Agenten. Das Ziel kann z.B. die Maximierung des Profits einer Firma sein. Bei der Tagesplanung ist ein solches Ziel nicht vorhanden bzw. zumindest nicht direkt ersichtlich (Minimierung der Ausgaben, Maximierung der Freizeit, Maximierung einer allgemeinen Nutzenfunktion, ...?). Demnach ist zielorientiertes autonomes Handeln im Bereich der Tagesplanung kaum abbildbar. Es sei denn, es werden konkrete Nutzenfunktionen unterstellt. Ein weiterer Punkt in der Definition eines Agentenmodells, der in dem für diese Arbeit erstellten Modell nicht berücksichtigt wird, ist die Kommunikation zwischen Agenten. In der hier durchgeführten Simulation werden Entscheidungen zum derzeitigen Zeitpunkt unabhängig von anderen Agenten getroffen. Der Begriff „Agent“ wird aber im Weiteren für die Simulationssubjekte der Mikrosimulation verwendet, ohne dass ein Bezug zu Agenten laut Definition der Agentensysteme besteht.

Da Aktivitäten für die in Kapitel 5.4 beschriebene Simulation von zentraler Bedeutung sind, wird im folgenden Abschnitt näher auf die aktivitätenbasierte Modellierung, die vor allem in der Verkehrsforschung eingesetzt wird, eingegangen.

## 5.2 Aktivitätenbasierte Modellierung

*“Electricity is always purchased by the consumer as an intermediate step towards some final, non-electrical product. No one wakes up in the morning saying “I want to consume 12kWh today.” Instead, they want the products electricity can produce when applied*

*through the actions of various appliances - a cool home in summer, a warm one in winter, hot water on demand, vegetables kept fresh in the refrigerator, and 48 inches of dazzling color with stereo commentary during Monday night football“ (vgl. [177], Willis, S.91).*

Speziell für die Elektrizitätsnachfrage zeigt dieses Zitat treffend den Zusammenhang zwischen Aktivitäten und Lebenseinstellungen von Menschen und der Energienachfrage. Im Zusammenhang mit dem Thema Energie sind Aktivitätensimulationen für vielfältige Fragestellungen bedeutsam, insbesondere auch unter anwendungsorientierten wissenschaftlichen Gesichtspunkten. Da die Energienachfrage stark mit den Aktivitäten der Konsumenten verbunden ist, könnten aktivitätenbasierte Modellierungen im Bereich des Demand Side Managements (DSM) Anwendung finden. Mit dem Ziel der Glättung der Last hat DSM verschiedenste Vorteile, wie z.B. bessere Auslastung von Kraftwerkskapazitäten, Verringerung nötiger Backup Kapazität oder geringere Stromgestehungskosten. Lastdaten sind entscheidend für die Planung von Elektrizitätsnetzen als auch für die Auslegung von Erzeugungskapazitäten (vgl. [124], Paatero u. Lund). Ein gutes Verständnis für die Ausgestaltung von Tagesabläufen (Aktivitäten) kann demnach die Grundlage für Energiebedarfsprognosen sein. Zur Potentialanalyse von DSM in Haushalten siehe z.B. von Roon et al. (vgl. [166], von Roon u. a.).

Neben DSM und Virtual Power Plants (VPP) sind die Erfassung von Aktivitäten auch im Verkehrsbereich von essentieller Bedeutung. Im Forschungsfeld Elektromobilität ist Vehicle-to-Grid (V2G) ein derzeitiger Untersuchungsgegenstand. Fluhr et al. (vgl. [56], Fluhr u. a.) untersuchten mittels stochastischer Simulation die Verfügbarkeit (Stromnetz-anbindung) von Elektrofahrzeugen auf Basis von Daten der Befragung Mobilität in Deutschland (MiD). Sie betonen die Bedeutung von Raum und Zeit, sowie die Wichtigkeit von Mobilitätsbedürfnissen für ihr Forschungsinteresse. Neue Technologien müssen im Einklang mit den Bedürfnissen der Menschen stehen, damit ihre Akzeptanz gewährleistet ist. So muss die Autobatterie geladen sein, wenn der Nutzer vor hat, mit dem Auto zu fahren. Nach Fluhr et al. führen wechselnde Ladeinfrastrukturen zu sehr verschiedenen Simulationsergebnissen. Verbesserungsmöglichkeiten ihrer Simulationsergebnisse sehen Fluhr et al. in einer verbesserten Abbildung des Fahrverhaltens sowie einer detaillierten räumlichen Auflösung (vgl. [56], Fluhr u. a.).

Aktivitäten, die die Tätigkeiten im Haushalt genauer erfassen, sind Gegenstand der Untersuchung der Zeitbudgetforschung (vgl. auch Abschnitt 4.3.1). Je nach Interessensgebiet wird eine große Bandbreite an Forschungsthemen bearbeitet, so dass ein allgemeiner

Forschungsstand nicht gegeben werden kann. Themen sind z.B. Zeit und Armut, Forschungen zu Genderfragestellungen, Gesundheit und Ernährung oder Erziehung. Für einen Überblick über die Zeitbudgetforschung sei deshalb auf die International Association for Time Use Research (IATUR)<sup>75</sup> oder auch auf das electronic International Journal of Time Use Research (eIJTUR)<sup>76</sup> verwiesen. Da Aktivitäten in Zusammenhang mit Simulationsmodellen bisher zum weitaus größten Teil in der Verkehrsforschung betrachtet werden, sei nachfolgend auf diesen Bereich näher eingegangen. Die Aktivitäten beschränken sich in diesem Zusammenhang jedoch nur auf Außer-Haus-Aktivitäten.

Im zeitlichen Ablauf lag der Fokus in der Verkehrsforschung zuerst auf Fahrtenanalysen, dann auf tourenbasierten und zuletzt auf aktivitätenbasierten Analysen. Eine gute Zusammenfassung aktivitätenbasierter Modellierung im Verkehrsbereich ist bei Timmermans zu finden (vgl. [161], Timmermans). Die historische Entwicklung aktivitätenbasierter Modelle wurde von Bowman beschrieben und wird hier nicht weiter betrachtet (vgl. [24], Bowman). Nachfolgend werden einige aktuelle Modelle im Transportbereich, die Aktivitäten abbilden, genannt.

#### Aktivitätenbasierte Modelle

- ALBATROSS (A Learning-Based Transportation Oriented Simulation System)
- CEMDAP (Comprehensive Econometric Microsimulator for Daily Activity-Travel Patterns)
- FAMOS (Florida Activity Mobility Simulator)
- MATSIM-T (Multi-Agent Transport Simulation Toolkit)
- TASHA (Travel Activity Scheduler for Household Agents)

CEMDAP und FAMOS sind zwei Modelle, die sich räumlich auf Gebiete der USA beziehen. Einen Überblick über aktivitätenbasierte Mikrosimulationsmodelle aus den USA liefern Bradley und Bowman (vgl. [26], Bradley u. J.). Beispiele und Zukunftsaussichten im Bereich der Modellierung von Haushaltsaktivitäten und Transport listen Timmermans und Zhang auf (vgl. [162], Timmermans u. Zhang).

Aktivitätenbasierte Modelle lassen sich nach ihrer zugrunde liegenden Methodik folgendermaßen unterscheiden (vgl. [89], Khandker).

---

<sup>75</sup>Zu finden unter <http://www.iatur.org/>

<sup>76</sup>Zu finden unter <http://www.eijtur.org/>

### Modellkategorien aktivitätenbasierter Modelle

- Single facet model
- Utility-maximization model
- Microsimulation model
- Constraint-based model
- Computational process model

Single facet Modelle betrachten jeweils nur ein mit Aktivitäten zusammenhängendes Attribut (z.B. Häufigkeit von Aktivitäten). Dagegen beinhalten Constraint-based Modelle mehrere Attribute. Die Aktivitätenwahl wird durch räumlich-zeitliche Beschränkungen bestimmt. Computational process Modelle unterscheiden sich von Utility-maximization Modellen dadurch, dass die Auswahl von Aktivitäten nicht durch eine Nutzenmaximierung bestimmt wird. Die Auswahl erfolgt bei den Computational process Modellen z.B. mit Hilfe von Verhaltensregeln. Die nach dieser Unterteilung fünfte Gruppe bilden Mikrosimulationen. Mikrosimulationsmodelle basieren auf Zufallsexperimenten.

Khandker (vgl. [89], Khandker) selbst bevorzugt eine Einteilung der Modelle in 3 Klassen.

- Utility-maximization model
- Computational or Rule-based model
- Hybrid model: combination of utility theory, rules, microsimulation and all other type models

Methodisch kommen bei der Nutzenmaximierung zumeist multinomiale Logit Modelle zum Einsatz. Die Annahme der Nutzenmaximierung ist bei der Entscheidung für bestimmte Aktivitäten durchaus kritisch zu sehen (vgl. z.B. [6], Avineri). So ist z.B. nicht immer klar, was der eigentliche Nutzen ist. Das Vorliegen sowie richtige Interpretieren vollständiger Informationen ist in der Realität auch nicht gegeben. Ein Beispielmmodell für den Nutzenansatz ist das Modell STARCHILD, das in den 1980er Jahren entwickelt wurde. Für Aktivitätengenerierung mittels zufälliger Nutzenmaximierung (random utility maximization - RUM) sei ebenfalls auf Khandker verwiesen (vgl. [90], Khandker).

Nach Khandker weisen Newell und Simon bereits 1972 darauf hin, dass menschliche Entscheidungsprozesse eher regelbasiert sind (vgl. [89], Khandker). Regelbasierte Modelle sind durch die klassischen *if then else* Anweisungen umgesetzt. ALBATROSS oder auch SMASH (Simulation Model of Activity Scheduling Heuristics) sind zwei Beispiele für regelbasierte Modellierungen.

Hybride Modelle sind eine weitere Möglichkeit der Modellierung, die derzeit eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist das Modell TASHA. Die Aktivitätenzeitplanung ist bei diesem Modell regelbasiert, die allgemeine Aktivitätengenerierung durch eine Mikrosimulation umgesetzt und die Verkehrsmittelwahl wird durch eine Nutzenmaximierung bestimmt (vgl. [137], Roorda u. Habib). Neben den genannten Modellen gibt es im speziellen verschiedene tourenbasierte Simulationen, die Aktivitäten abbilden. Viele dieser Modelle, die für praktische Planungsziele eingesetzt werden, beziehen sich räumlich auf Agglomerationen der USA. In diesem Zusammenhang sind die folgenden Modelle zu nennen.

#### Tourenbasierte Modelle

- METRO (Portland)
- SFCTA (San Francisco County Transportation Authority)
- NYMTC (New York Metropolitan Transportation Council)
- MORPC (Columbus - Mid-Ohio Regional Planning Commission)
- ARC (Atlanta Regional Commission)

Diese Modellansätze versuchen die Schwächen des traditionellen 4-Stufen Ansatzes (Verkehrserzeugung, Verkehrsziele, Verkehrsmodus, Verkehrsumlegung) zu beheben<sup>77</sup>. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind bei Vovsha et al. thematisiert (vgl. [167], Vovsha u. a.).

Im Transportbereich liegt der Fokus der Aktivitätenforschung auf den Außer-Haus-Aktivitäten. In diesem Zusammenhang können auch die Möglichkeiten eines GIS genutzt werden (z.B. für Erreichbarkeits- oder Netzwerkanalysen). Die Verwendung von GIS als Werkzeug für die Analyse von Haushaltsaktivitäten wird unter anderem bei Buliung und Kanaroglou beschrieben (vgl. [34], Buliung u. Kanaroglou).

Die Modellierung von Aktivitäten besteht aus verschiedenen Schritten, wobei die einzelnen Bereiche sowohl von theoretischem als auch von praktischem Forschungsinteresse sind. Dazu zählt unter anderem die Erzeugung einer künstlichen Population für die

---

<sup>77</sup>Die Nachteile des 4-Stufen Ansatzes sind unter anderem: Die unzureichende Abbildung von Touren, der fehlende Zusammenhang zwischen verschiedenen Touren an einem Tag oder im Bereich der Aggregation eine unzureichende zeitliche, räumliche und demographische Auflösung der repräsentierten Realität (vgl. [167], Vovsha u. a.).



Abbildung realer Verhältnisse, was die Voraussetzung für die sich anschließenden Simulationen darstellt<sup>78</sup>. Der Forschungsstand bezüglich der Erzeugung synthetischer Populationen ist bei Müller und Axhausen beschrieben (vgl. [116], Mueller u. Axhausen)<sup>79</sup>.

Abschließend sei in diesem Abschnitt auf eine aktivitätenbasierte Modellierung verwiesen, die nicht dem Bereich erwähnter Verkehrsnachfragemodelle zuzuordnen ist. Im Energiebereich sind viele Modelle für ganz spezielle Fragestellungen konzipiert (z.B. Untersuchung des Wärmebedarfs festgelegter Städte). Im Gegensatz dazu hat Synthetic City (SynCity) den Anspruch breiter einsetzbar zu sein und ist unter anderem für die optimale Erschließung neuer Bebauungsgebiete gedacht. Das Modell besteht aus den drei Submodellen Layout, Agentenaktivitäten und Technologien (vgl. [88], Keirstead u. a.). Dabei wird im Layoutschritt, der die urbane Form beschreibt, Mixed Integer Linear Programming (MILP) verwendet. Dies unterscheidet den Ansatz auch von der in dieser Arbeit vorgestellten Simulation, in der der Fokus auf der Abbildung von Agententätigkeiten liegt und keine Optimierung zum Einsatz kommt. Die Aktivitätenabbildung in SynCity erfolgt anhand des 4-Stufen Ansatzes. Das dritten Submodell zielt darauf ab, die Energieversorgungsstruktur einer Stadt zu optimieren (vgl. [88], Keirstead u. a.).

Nach der Betrachtung individuen- und aktivitätenbasierter Modellierungsansätze werden in Kapitel 5.3 der Hintergrund und die Rahmenbedingungen für Simulationen im urbanen Kontext als auch speziell für die implementierte Simulation betrachtet.

## 5.3 Ausgangspunkt urbaner Aktivitätensimulationen

In diesem Kapitel soll der Modellierungshintergrund näher beschrieben werden, bevor die konkrete Umsetzung der Simulation im Abschnitt 5.4 dargelegt wird. Wie bereits erwähnt, sind Städte komplexe Systeme. Da eine Vereinfachung der Zusammenhänge für die Modellbildung notwendig ist, stellt sich die Frage, in welchen Bereichen zusammengefasst und vereinfacht werden kann, ohne sich zu weit von realen Gegebenheiten zu entfernen. Die innere Struktur, sowie die Rahmenbedingungen denen Städte unterliegen,

---

<sup>78</sup>Andere Teilbereiche/Teilmodelle von besonderem Forschungsinteresse sind beispielsweise: Migrationsmodelle, Modelle zur Beschreibung der sozioökonomischen Entwicklung und Besitz- bzw. Verfügbarkeitsmodelle (z.B. hinsichtlich Autoverfügbarkeit).

<sup>79</sup>Das Standardverfahren zur realistischen Abbildung von Populationen ist dabei das IPF (Iterative proportional fitting).



sollen in diesem Kapitel näher vorgestellt werden. Dies soll Zusammenhänge verdeutlichen, mögliche Generalisierungen aufzeigen und Potentiale für weitere Arbeiten kenntlich machen. Des Weiteren wird in diesem Kapitel näher auf die Simulationssubjekte eingegangen.

Urbane Aktivitätsmuster können räumlich und zeitlich verschieden aufgelöst werden. Simulationen können dabei auf real bestimmten oder synthetisch erzeugten Daten aufbauen. Die vorliegende Simulation bezieht sich nicht auf einen real existierenden Raum. Die in diesem Modell verwendete Raumausstattung als auch die zu simulierende Stadtbevölkerung basieren in großen Teilen auf künstlich erzeugten, mit der Realität in Einklang stehenden, Daten. Da energetisch relevante Fragestellungen zumeist mit konkreten Räumen verknüpft sind, sollten Aktivitätssimulationen prinzipiell auf konkrete Städte anwendbar sein, um einen lokalen praktischen Nutzen zu generieren. Eine solche Simulation konkreter Städte wäre immer an lokal spezifische Gegebenheiten und die jeweilige Datengrundlage anzupassen. Das Ziel dieser Arbeit ist es somit, ein Rahmenmodell zu entwickeln, das mit verhältnismäßig wenig Aufwand angepasst werden kann. Es ist aber absehbar, dass auch ein solches Rahmenmodell einer stetigen Anpassung und Veränderung unterliegt (Datengrundlage, Wahrnehmung, ...).

### 5.3.1 Innere Rahmenbedingungen für urbane Modellierungen

Der Begriff *Innere Rahmenbedingungen* umfasst vornehmlich die infrastrukturelle Ausstattung innerhalb der Stadtgrenzen. Dieser Begriff wurde als Komplement zu dem im nächsten Abschnitt (vgl. Abschnitt 5.3.2) verwendeten Begriff der *Äußeren Rahmenbedingungen* gewählt. Unter äußeren Bedingungen werden die demographische Entwicklung, die Wirtschaftsentwicklung, der Klimawandel und die Gesetzgebung verstanden. Faktoren die nicht in diese Kategorien fallen werden der Kategorie innere Rahmenbedingungen zugeordnet<sup>80</sup>. Dieser Abschnitt behandelt die in diesem Zusammenhang als wichtig angesehenen Faktoren für eine urbane Simulation und zeigt die Abgrenzungen bzw. Einschränkungen hinsichtlich des konkret umgesetzten Modells auf.

Städte können raumordnerisch hinsichtlich ihrer Zentralität in Klassen eingeteilt werden. Die Zuordnung zu diesen Klassen, die im Folgenden genannt werden, wird in den Landesentwicklungsplänen (LEP) bzw. den Landesraumordnungsplänen festgelegt. In

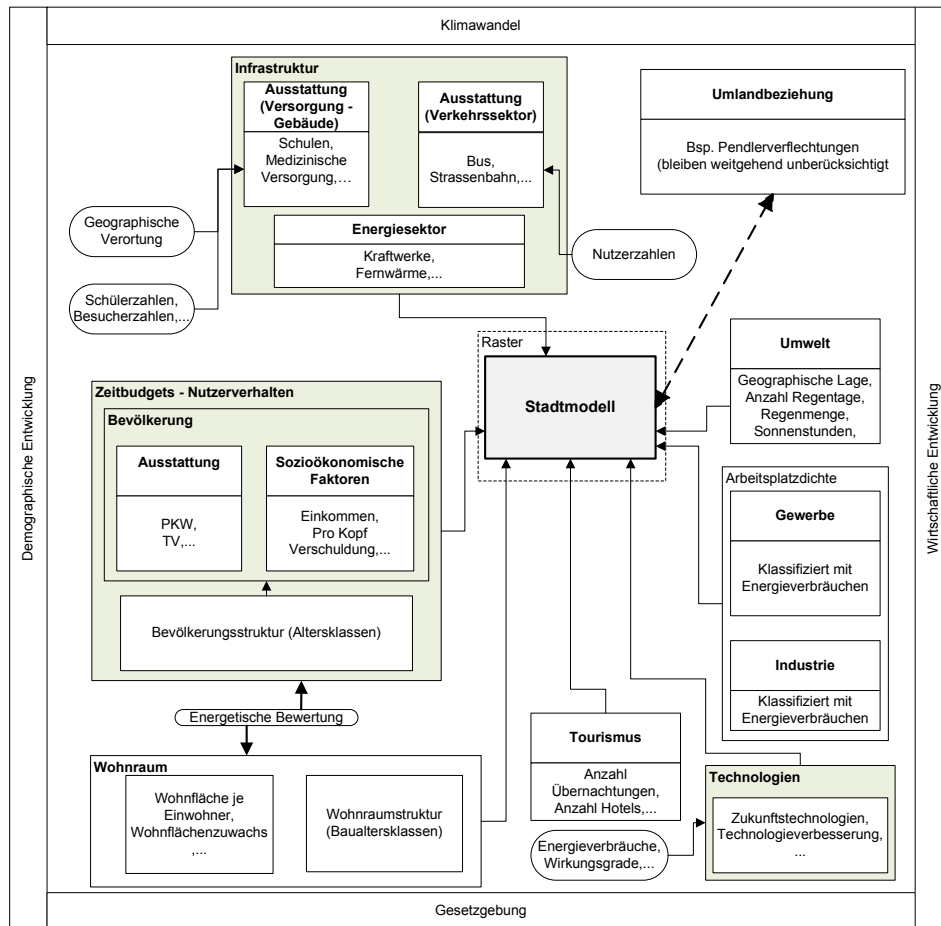
---

<sup>80</sup>Die Unterscheidung in innen und außen folgt demnach keinen logisch zwingenden Gründen. Sie dient der separaten Beschreibung der hier unter äußeren Bedingungen zusammengefassten Faktoren.

Deutschland werden Ober-, Mittel- und Unterzentren unterschieden. Des Weiteren gibt es Kategorien, die Zwischenstufen beschreiben als auch die Klasse der zentralen Orte im ländlichen Raum. Um den Status einer gewissen Klasse zu erreichen, müssen Mindestausstattungen im Bereich der Infrastruktur als auch Mindestwerte im Bereich der Bevölkerung erreicht werden. Die Informationen über Ausstattungen sollten neben weiteren Daten von statistischen Ämtern und Behörden (z.B. Bevölkerungsdaten) in ein Simulationsmodell einfließen. Dies kann durch Datenbankschnittstellen realisiert werden. Die Erfassung verschiedenster verfügbarer Datenbestände, sowie ein ausgereiftes Datamining sind in diesem Kontext von großer Bedeutung.

Die folgende Abbildung veranschaulicht die für die Energiestruktur von Städten als wichtig eingestuften Einflussgrößen (vgl. Abb. 5.3).

**Abbildung 5.3:** Modell einer energetisch betrachteten Stadt



Die technische und die soziale Infrastruktur sind die wesentlichen Bestandteile eines Stadtmodells. Zur technischen Infrastruktur zählen z.B. Kraftwerke, Fernwärmenetze aber auch die Verkehrsinfrastruktur, wie Straßen. Zu sozialer Infrastruktur gehören beispielsweise öffentliche und kulturelle Einrichtungen sowie Einrichtungen der medizinischen Versorgung. In der hier durchgeführten Simulation umfasst die technische Infrastruktur jedoch nur die Standorte von Gebäuden, also Wohnraum-, Gewerbe- und Industriebauung. Aus dem Bereich der sozialen Infrastruktur erfolgt eine Auswahl, so dass Kindergärten, Schulen, Restaurants oder auch Einkaufsmöglichkeiten abgebildet werden können. Informationen über die Stadtbevölkerung (z.B. Alter und Einkommen)

als auch die Ausstattung der Haushalte zählen ebenfalls zu den inneren Gegebenheiten einer Stadt.

Das Bedürfnis der Stadtbevölkerung nach Ortsveränderungen (z.B. Erreichen des Arbeitsplatzes) führt zu Verkehrsnachfragen. Verkehrsnachfragen sind dabei mit Aktivitäten, Zeitbudgets und Energieflüssen verbunden. Grundlegend kann Verkehr in immateriellen (Daten) und materiellen Verkehr (Personen, Güter) unterschieden werden. Hierbei lässt sich der materielle Verkehr wiederum unterteilen, so dass in feinerer Gliederung z.B. Berufs-, Freizeit-, Einkaufs-, Dienstleistungs- und Güterwirtschaftsverkehr voneinander unterschieden werden können. In dieser Arbeit wird nur der materielle Verkehr betrachtet. Die Bedeutung des immateriellen Verkehrs, sowie seine möglichen Auswirkungen auf den materiellen Verkehr wurden unter anderem von Shaw und Yu (vgl. [148] Shaw u. Yu) betont und bei Kwan (vgl. [101] Kwan) eingehender beschrieben. Kwan geht darauf ein, dass Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) im Alltag der Menschen von steigender Bedeutung sind. IKT bieten die Möglichkeit, Aktivitäten “unabhängig“ von Zeit und Raum auszuführen (e-shopping, e-banking, ...). Die Nutzung von IKT kann Zeit sparen, was zu weiteren bzw. ausgedehnten Aktivitäten führen kann. Andererseits reduziert die Nutzung von IKT die Zeiten für andere Aktivitäten. Der potentielle Einfluss von IKT auf den urbanen Verkehr wird von Kwan daher als komplex beschrieben. Kwan erkennt, dass Distanzen als Erklärung für die Herausbildung urbaner Formen zunehmend an Bedeutung verlieren und folgert, dass im Zeitalter mobiler Kommunikation für die Untersuchung urbaner Verkehrsnachfrage neue Konzepte und Methoden notwendig sind.

Der materielle Transport wird in dieser Arbeit weiterhin eingeschränkt. Betrachtet wird lediglich der private und öffentliche Personenverkehr, was nur einem Teil des städtischen Verkehrsaufkommens entspricht. Der Verkehrssektor nimmt einen großen Anteil am gesamtstädtischen Energieverbrauch ein. Im Beispiel von Wien unterteilte sich der Endenergieverbrauch der Stadt im Jahr 2007 in folgender Weise<sup>81</sup>:

- private Haushalte: 30%
- Verkehr: 40%
- Öffentliche und private Dienstleistungen: 19%
- produzierender Bereich und Landwirtschaft: 11%

---

<sup>81</sup>Quelle: <http://www.wien.gv.at/wirtschaft/eu-strategie/energie/zahlen/energieverbrauch.html>

Der Anteil des Wirtschaftsverkehrs am städtischen Gesamtverkehr kann, wie der Vergleich zwischen verschiedenen Städten zeigt, stark variieren. An Werktagen betrug der Anteil des Wirtschaftsverkehrs 20% bis 60% aller städtischen Fahrten. Ein hoher Anteil tritt dabei besonders in Innenstadtbereichen auf (vgl. [5] Arndt u. a.). Insofern wird ersichtlich, dass durch die Einschränkungen große Teile der aufkommenden städtischen Energienachfrage nicht abgebildet werden.

Pendler gehören teilweise nicht zur eigentlichen Stadtbevölkerung (Einpendler), führen jedoch verschiedenste Aktivitäten innerhalb der Stadt durch. Das Gleiche gilt für Touristen, die z.B. für Tagesausflüge in die Stadt reisen. Pendlerverflechtungen als auch der Tourismus sind für konkrete Städte oft nicht zu vernachlässigende Größen. Die Bedeutung dieser Bereiche kann für verschiedene Städte erheblich schwanken. In diesem Zusammenhang sind tageszeitliche und saisonale Abhängigkeiten zu betrachten. Trotz der mitunter großen Bedeutung wurden diese Bereiche für die vorliegende Simulation nicht betrachtet. Dies vor allem auf Grund des Fokus auf den städtischen Haushaltssektor.

Die Einbettung der Stadt in ihre geographische Umgebung ist unbestritten bedeutsam. Die Vernetzung der Stadt mit ihrem Hinterland, sei es durch wirtschaftlichen, sozialen oder kulturellen Austausch, wird jedoch in den meisten Stadtenergiemodellen nicht adäquat abgebildet. Die Stadt wird für die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung als abgeschlossenes System betrachtet. In einfacher Form könnte das Umland als black box modelliert werden. Importe aus oder Exporte in das Umland wären somit möglich. Pendler oder auch Touristen könnten mitbetrachtet werden. Da die stadtreionale Vernetzung immer mehr an Bedeutung gewinnt, sind weitere Forschungsarbeiten und umfangreichere Modellierungsansätze notwendig. In diesem Zusammenhang sei auf das Forschungsprogramm *Modellvorhaben der Raumordnung* (MORO) verwiesen, das sich in einem Teilbereich mit der Einbindung regenerativer Energien in regionale Energiekonzepte beschäftigt. Im Bereich der erneuerbaren Energien ist die Bedeutung von Stadt-Umland-Beziehungen, genauer gesagt der Einfluss von Stadt-Umland-Allianzen auf den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch, z.B. durch Nölting et al. dokumentiert (vgl. [120] Nölting u. a.).

Wie in diesem Kapitel beschrieben, gibt es viele Faktoren, die die städtische Energienachfrage beeinflussen. Daraus ergibt sich, dass vielfältigste Daten zur Erklärung von Nachfragen herangezogen werden können und müssen. Neben der unterschiedlichen Verfügbarkeit, sowie der Datenqualität (Vollständigkeit, Konsistenz, Redundanz, ...)

ist außerdem zu beachten, dass Daten in verschiedensten Formaten ausgegeben werden und vielfältige Korrelationen bestehen. Das Thema Daten nimmt demnach spätestens bei der Simulation in Bezug auf reale Orte eine zentrale Stellung ein.

Im nachfolgenden Abschnitt wird ergänzend zu der in diesem Kapitel aufgezeigten inneren Struktur von Städten, auf wesentliche von außen vorgegebene Einflüsse hingewiesen. Für Simulationen sind die äußeren Rahmenbedingungen für Szenariobildungen bedeutsam.

### 5.3.2 Äußere Rahmenbedingungen für urbane Modellierungen

Es gilt hier die Rahmenbedingungen zu beschreiben, die Auswirkungen auf Städte haben, jedoch von städtischer Seite nicht oder nur sehr begrenzt beeinflusst werden können<sup>82</sup>. Zu den äußeren Faktoren zählen in diesem Zusammenhang Gesetzgebung, Klimawandel, demographische Entwicklung aber auch die allgemeine Wirtschaftslage (vgl. Tabelle 5.1). Klimawandel und demographische Entwicklung sind zwei wesentliche Themen, mit denen sich Städte heute als auch in Zukunft beschäftigen müssen. Wirtschaftliche Entwicklungen und gesetzliche Vorgaben sind weitere wichtige Einflussfaktoren auf die Stadt, die mit vielfältigen Herausforderungen verbundenen sind. Diese Zusammenstellung der äußeren Rahmenbedingungen hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. So sind z.B. technologische Entwicklungen oder auch damit einhergehende Nutzungsänderungen, z.B. im Bereich moderner Kommunikationswege, hier nicht betrachtet.

---

<sup>82</sup>Es sei hier wiederholt darauf hingewiesen, dass die Begriffe “Innen“ und “Außen“ hier eher anschaulich zu verstehen sind und eine exakte Trennung dieser nicht vorgenommen wird bzw. diese auch in der Realität nicht gegeben ist.

**Tabelle 5.1:** Rahmenbedingungen einer Stadt

<b>Demographische Entwicklung</b>	<b>Gesetzgebung</b>
<p>Die allgemeine demographische Entwicklung der Länder veranlasst Städte zu vielfältigem Handeln. Herausforderungen und Chancen sind dabei in einem Arbeitspapier des deutschen Städtetages dokumentiert (vgl. [41], Deutscher Städtetag (Hrsg.)). Da der demographische Wandel Bereiche wie Kaufkraft oder den Wohnungsmarkt beeinflusst, sind Simulationen an dieser Stelle hilfreich. Änderungen der Konsumausgaben privater Haushalte, insbesondere auch für Energie, hervorgerufen durch den demographischen Wandel, sind von Kronenberg untersucht worden (vgl. [99], Kronenberg).</p>	<p>Gesetze und Verordnungen auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene beeinflussen die Entwicklungsmöglichkeiten einer Stadt. Aktivitäteneinschränkungen ergeben sich zum Beispiel durch die gesetzlichen Regeln zu Ladenöffnungszeiten. Die Verbreitung Energie erzeugender Technologien (z.B. Solarzellen) wird durch staatliche Anreize (z.B. Einspeisevergütung durch das EEG) gefördert. Die Simulation der Auswirkungen von Anreizen stellt eine wichtige Aufgabe von Mikrosimulationen dar. Der Einfluss nationaler Politik (z.B. Steuern) auf die lokale Ebene durch Mikrosimulationen wurde u.a. von Ballas und Clarke untersucht (vgl. [8], Ballas u. Clarke).</p>
<b>Klimawandel</b>	<b>Allgemeine wirtschaftliche Lage</b>
<p>Auswirkungen des Klimawandels können in auf Aktivitäten basierenden Modellen insofern abgebildet werden, als dass eine erhöhte Nachfrage nach Elektrizität (Kühlung) bzw. eine zusätzlich sinkende Nachfrage nach Wärme bei steigenden Temperaturen unterstellt werden kann. Bei der Modellierung der Agententätigkeiten kann bei einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur von einem veränderten Verhältnis der häuslichen zu außerhäuslichen Aktivitäten ausgegangen werden. Die Bedeutung wie auch die Herausforderungen für Städte hinsichtlich des Klimaschutzes sind u.a. durch ein Positionspapier des deutschen Städtetages (vgl. [42], Deutscher Städtetag (Hrsg.)) dokumentiert.</p>	<p>Die gesamtwirtschaftliche Lage beeinflusst die Stadt. Städte haben Beziehungen auf verschiedenen geographischen Maßstäben (Umlandbeziehung bis Verknüpfung zum globalen Maßstab). Die wirtschaftliche Lage beeinflusst zuerst den Industriesektor, betrifft aber auch den Gewerbe- und Haushaltsbereich. In der Aktivitätensimulation kann die unterschiedliche wirtschaftliche Situation im Haushaltsbereich durch veränderte Haushaltseinkommen, veränderte Haushaltsausstattung sowie durch die individuelle Arbeitssituation abgebildet werden. Dieses wiederum beeinflusst die Auswahl der Tagesaktivitäten.</p>

Die in Tabelle 5.1 genannten Faktoren können und sollten in Simulationsmodellen, auch wenn dies mitunter nur in vereinfachter Form geschehen kann, beachtet werden. Für das hier erstellte Modell können die angesprochenen Rahmenbedingungen für die Simulationsdurchläufe als konstant angesehen werden, da immer nur die Aktivitäten innerhalb eines 24 h Zeitraumes simuliert werden. Jedoch können Simulationen unter variierenden, aber dann festgesetzten äußeren Rahmenbedingungen studiert werden.

Der zentrale Teil der Aktivitätensimulation bezieht sich auf die Bevölkerung, deren Tagesablauf abgebildet wird. Da in anderen Forschungsdisziplinen angenommen wird, dass es Gruppen mit gleichen Einstellungen bzw. gleichem Konsumverhalten gibt, betrifft eine grundsätzliche Fragestellung die Möglichkeiten der Gruppierung der zu simulierenden Subjekte. Dieses Thema wird im anschließenden Abschnitt näher behandelt.

### 5.3.3 Klassifikation der Simulationssubjekte

Eine Gruppierung der Simulationssubjekte ist von Vorteil, da sie die Simulation einerseits vereinfacht. Andererseits kann aber auch davon ausgegangen werden, dass es in der realen Bevölkerung bestimmte in sich homogene Gruppen gibt. Somit können durch eine Gruppierung reale Verhaltensweisen besser abgebildet werden. Eine solche Klassifikation wird sich hinsichtlich des betrachteten Raumes unterscheiden. So ist die indische Gesellschaft (Kastensystem) sicher anders als andere Gesellschaften zu gruppieren. Bezüglich der Zeit ist der historische Kontext zu beachten, so dass Gesellschaften vergangener Zeiträume anders zu bewerten sind als heutige. Eine allgemeingültige Gruppierung von Bevölkerung kann es daher nicht geben.

Die Abbildung von Verhalten durch die Einteilung in Gruppen wird durch Schlich für den Bereich der Verkehrsforschung umfassend diskutiert (vgl. [144], Schlich). Für den Autor lautet die Kernfrage: “*Wie sind Personengruppen gegeneinander abzugrenzen, damit sich ihr Verhalten möglichst deutlich voneinander unterscheidet?*“ ([144], Schlich, S.29). Im Ergebnis sieht Schlich eine Einteilung der Bevölkerung in Gruppen als zeitgemäß an, da einerseits das Verständnis von Zusammenhängen verbessert werden kann und andererseits Vorteile für die Modellierungspraxis zu verzeichnen sind.

Ein möglicher Ansatz für die Gruppierung von Menschen ist die Einteilung in soziale Milieus. Neben den Milieus zur Gruppierung einer Gesellschaft gibt es weitere Einteilungskonzepte (z.B. Klassen und Schichten). Dieser Abschnitt bezieht sich vordergründig auf den Begriff der sozialen Milieus, da diese in der betriebswirtschaftlichen Forschung



für viele Fragestellungen, besonders in der Marktforschung, Verwendung finden. Unter sozialen Milieus werden in der Forschung Gruppen Gleichgesinnter verstanden, die jeweils ähnliche Werthaltungen, Prinzipien der Lebensgestaltung, Beziehungen zu Mitmenschen und Mentalitäten aufweisen (vgl. [78], Hradil). Im Alltag bezieht sich der Begriff soziale Milieus auf Gruppierungen von Menschen, die in ähnlichen Umständen leben, ähnlich denken und deren Verhalten in ähnlicher Weise geprägt ist. Der alltägliche Sprachgebrauch kommt der wissenschaftlichen Definition nach Hradil recht nahe (vgl. [78], Hradil). Milieus sind von diversen Faktoren, wie z.B. Bildungsgrad oder Einkommen, abhängig. Die bekannteste Milieueinteilung für Deutschland stammt von der Sinus Sociovision GmbH (sog. Sinus Milieus). Sie unterscheidet derzeit 10 Milieus, die sich teilweise überschneiden und fortlaufend angepasst werden. In einer Studie zum Umweltbewusstsein und Umweltverhalten, die vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlicht wurde, sind diese sozialen Milieus für Deutschland beschrieben (vgl. [178], Wippermann u. a.). Basierend auf den Zahlen der UBA-Veröffentlichung sind die sozialen Milieus in Deutschland folgendermaßen verteilt (vgl. [178], Wippermann u. a.):

- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| • Etablierte (10%)            | • DDR-Nostalgische (5%)      |
| • Postmaterielle (10%)        | • Bürgerliche Mitte (15%)    |
| • Moderne Performer (10%)     | • Konsum-Materialisten (12%) |
| • Konservative (5%)           | • Experimentalisten (8%)     |
| • Traditionsverwurzelte (14%) | • Hedonisten (11%)           |

Nach der Studie des UBA steht Umweltbewusstsein im Zusammenhang mit Umweltverhalten. Umweltschutz wird von vielen Menschen als wichtig begriffen. Daraus kann auf einen Einfluss des Umweltbewusstseins auf Aktivitäten als auch auf die Energienachfrage geschlossen werden. Die Verbesserung der Energieeffizienz, als auch die verstärkte Nutzung von regenerativen Energien werden als wichtige Zukunftsaufgaben angesehen (vgl. [178], Wippermann u. a.). Die oben genannte Studie zeigt u.a., dass es ein hohes Problembewusstsein für die mit dem Klimawandel einhergehenden Folgen gibt und dass eine große Bereitschaft zu umweltbewusstem Alltagsverhalten vorhanden ist. Interessant ist hierbei, dass laut der UBA-Veröffentlichung traditionelle Milieus die Umwelt am meisten schonen (vgl. [178], Wippermann u. a.).

In seinem Agentenmodell zur Analyse von Investitionsentscheidungen in städtischen

Energiesystemen berücksichtigt Wittmann 3 Milieus im Bereich der privaten Akteure (Etablierte, Traditionalisten und Technologieführer). Diese wurden aus den Sinusmilieus abgeleitet (vgl. [180], Wittmann). Die Milieus bei Wittmann unterscheiden sich hinsichtlich der Wichtigkeit ihrer Ziele, der Suchstrategie und des rationalen Handels. Außerdem wurden Beschränkungen z.B. hinsichtlich des Budgets als auch des Komfortanspruches berücksichtigt.

Das der private Gesamtenergieverbrauch nicht nur durch Einkommen und Energiepreise beeinflusst wird, ist schon länger bekannt. So lautet z.B. die zentrale These von Schipper et al., dass Veränderungen der Aktivitätsmuster (bei Schipper et al. Lebensstile) bei nahezu konstanten Einkommen und Energiepreisen zu substantiellen Änderungen des Energieverbrauchs führen können (vgl. [143], Schipper u. a.). Dies gilt nach den Autoren besonders für die Langfristperspektive. Ihre Veröffentlichung aus dem Jahr 1989 trägt den Titel: „*Linking Life-styles and Energy use: A matter of time?*“.

Auf globaler Ebene versuchte das PIK (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) Lebensstile und Energieverbrauch zu koppeln (vgl. [133], Reusswig u. a.). Die Autoren der PIK Studie begründen die Relevanz von Lebensstilen für die Energieversorgung damit, dass Lebensführung nicht nur ein sozialer und kultureller Vorgang ist, sondern für die Lebensführung natürliche Ressourcen und Materialien benötigt werden. Nach Hradil sind Lebensstile durch einen wiederkehrenden Zusammenhang von Verhaltensweisen, Interaktionen, Meinungen, Wissensbeständen und bewertenden Einstellungen eines Menschen gekennzeichnet (vgl. [77], Hradil). Nach den Autoren der PIK Studie umfassen Lebensstile die Bereiche soziale Lage, Mentalität und Performanz<sup>83</sup>. Entgegen dem umfassenden Begriffs des Lebensstils fokussiert die Studie auf den Konsumbereich, da in anderen Bereichen die Datenlage sehr schlecht ist. Die Autoren sehen daher in diesem Bereich vermehrten Forschungsbedarf.

Im Zusammenhang mit der Energienutzung von Haushalten können Lebensstile durch Zeitmuster und Geldströme beschrieben werden (vgl. [171], Weber u. Perrels). Zeitmuster werden durch soziale und technische Bedingungen beeinflusst. Sie bestimmen nach Weber und Perrels zu einem großen Teil den Typ und die Menge der benötigten Energie in einem Haushalt. „*Contrary to approaches often found in marketing research, no lifestyle groups or types have been identified since earlier studies in this direction provided no satisfactory results*“ (vgl. [171], Weber u. Perrels, S.550). Resultierend aus dieser Er-

---

<sup>83</sup>Die soziale Lage beschreibt dabei Handlungsmöglichkeiten. Der Begriff Mentalität umfasst Werte, Präferenzen und Haltungen. Der Begriff Performanz bezieht sich auf Alltagspraktiken.

kenntnis wurden von Weber und Perrels Haushalte nach ihrer Stellung im Lebenszyklus (z.B. junge Singles, junge Pärchen, ...) unterschieden und in Zusammenhang mit weiteren sozioökonomischen Charakteristika wie Einkommen, Bildung aber auch der Größe der jeweiligen Kommune betrachtet. Weber und Perrels identifizierten als entscheidende Einflussgrößen auf den Energiebedarf das Einkommen, die berufliche Situation und die Ausgestaltung des individuellen Konsums.

Vringer, Aalbers und Blok untersuchten den Gesamtenergiebedarf unter Berücksichtigung von Wertemustern (value pattern). Mittels Clusteranalyse wurden acht Cluster (Milieus) festgelegt. Die Autoren fanden allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich des Gesamtenergieverbrauchs (vgl. [168], Vringer u. a.). Sie betonen, dass der Energieverbrauch von sozioökonomisch vergleichbaren Haushalten erheblich variieren kann. Diese Variationen sind auf unterschiedliches Konsumverhalten zurückzuführen. Die Autoren zitieren Valette-Florence u. Jolibert, die unabhängig von sozioökonomischen Einflussfaktoren einen schwachen aber nicht vernachlässigbaren Zusammenhang zwischen Werteeinstellungen und Konsummustern fanden (vgl. [168], Vringer u. a.). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es bei der Milieubetrachtung im Bereich der Energienachfrage und der Zeitnutzung weiteren Forschungsbedarf gibt. Wie die Arbeiten von Weber und Perrels sowie von Vringer, Aalbers und Blok zeigen, scheint der Einfluss bisheriger Gruppierungen auf den Energieverbrauch jedoch begrenzt zu sein. Aufbauend auf den bisherigen Untersuchungen erhalten die Agenten in dem in dieser Arbeit erstellten Modell die soziodemografischen Eigenschaften Alter, Geschlecht und Einkommen. Die Stellung im Lebenszyklus wird durch die Faktoren berufliche Position und Haushaltsgröße mitbetrachtet. Da bisherige Arbeiten keine zufriedenstellenden Ergebnisse im Bezug auf den Einfluss von speziellen Gruppierungen auf den Energieverbrauch zeigten, wird in dieser Arbeit lediglich eine binäre Unterscheidung in eine umweltbewusste oder weniger umweltbewusste Einstellung implementiert.

Im nächsten Kapitel wird untersucht, wann Personen im Alltag individuelle Entscheidungen fällen oder wann Gruppenentscheidungen getroffen werden. Dafür findet nachfolgend eine genauere Betrachtung von Individuen und Haushalten statt.

### **5.3.4 Entscheidungsträger (Individuen versus Haushalte)**

Im Zentrum des hier beschriebenen Modells stehen einzelne Individuen. Andererseits müssen jedoch auch Haushalte betrachtet werden, nicht zuletzt aufgrund der Ener-

gienachfrage. Haushalte sind die kleinsten sozialen Einheiten, die wechselnde Güter und Dienstleistungen in komplexer Weise konsumieren (vgl. [19], Biesiot u. Noorman)<sup>84</sup>. Die einzelnen Individuen, die die verschiedenen Haushalte bilden, sind bei der Auswahl ihrer Tagesaktivitäten von der Ausstattung als auch von der Lage des Haushaltes beeinflusst. Die gemeinsame Nutzung von Haushaltstechnologien (z.B. Nutzung des Autos für einen Familienausflug) bedingt eine Absprache der Individuen. Demnach gibt es sowohl rein individuelle als auch Gruppenaktivitäten. Diese Gruppen können aus Teilmengen der Haushaltsmitglieder oder auch aus Individuen verschiedener Haushalte bestehen. Dabei ist es durch vorhandene IKT möglich, dass sich zwei vorher nicht bekannte Individuen verabreden. Hierbei kann z.B. an Mitfahrgelegenheiten gedacht werden.

Für eine Aktivitätenmodellierung stellt sich somit die Frage, wie Entscheidungen für einzelne Aktivitäten adequat abgebildet werden können. Anggraini fasst die Herausforderungen bei der Modellierung von Aktivitäten der Individuen in Haushalten durch folgende Punkte zusammen (vgl. [3], Anggraini):

- Gemeinsame Aktivitäten bedürfen einer zeitlichen und räumlichen Synchronisation
- Ressourcen müssen teilweise unter den Individuen aufgeteilt werden
- Einige Haushaltsaktivitäten werden nur von einem Haushaltsmitglied durchgeführt

Ein Konsens, was angemessene Modelle für die Modellierung von Haushaltsentscheidungen sind, gibt es derzeit nicht (vgl. [31], Browning u. a.). Nach Browning, Chiappori und Lechene hängt die Wahl des Modellierungsansatzes vom Kontext ab. In der Mikroökonomik unterscheiden Chiappori et al. die folgenden beiden Klassen von Haushaltsentscheidungsmodellen (vgl. [39], Chiappori u. a.):

- Kooperative Modelle (Pareto Optimal, Nash Bargaining and Unitary Models)
- Nichtkooperative Modelle

Da Haushalts- bzw. individuelle Entscheidungen oft mit Außer-Haus-Tätigkeiten verbunden sind, muss Mobilität/Verkehr prinzipiell mit beachtet werden. In diesem Zusammenhang veröffentlichte die Fachzeitschrift *Transportation* eine Ausgabe im Jahr 2005, die sich dem Thema Haushaltsentscheidungen widmet. Interaktionen und Gruppenentscheidungen, sowie deren Modellierung, stellen einen Schwerpunkt dieser Veröffentlichungen

---

<sup>84</sup>Die Untersuchung der Metabolismen von Haushalten erfordert das Verständnis von sich verändernden Lebensstilen (vgl. [19], Biesiot u. Noorman).

dar (vgl. [17], Bhat u. Pendyala und [27], Bradley u. Vovsha). Der aktuelle Forschungsstand bei der Modellierung von Haushaltsaktivitäten im Zusammenhang mit Mobilität wird u.a. bei Timmermans und Zhang beschrieben ([162], Timmermans u. Zhang). Die Autoren gehen insbesondere darauf ein, dass die entwickelten Modelle in Zukunft verstärkt Interaktionen und Interdependenzen abbilden müssen, anstatt den Fokus auf reine individuenbasierte Entscheidungen zu legen. Aktuelle Methodiken der Modellierung sind hierbei im Bereich der *group decision theory*, *utility theory*, *latent class modeling*, *rule based modeling* sowie der *Mikrosimulation* angesiedelt. Neue Richtungen bei der Modellbildung sind das *concept of stress* und das *concept of need*. Stress tritt dort auf, wo Anforderungen und Wünsche nicht mit einer gegebenen Situation übereinstimmen. Needs sind die Bedürfnisse von Haushalten. Eine Veränderung der Bedürfnisse führt zu einer anderen Nutzenbewertung von Tätigkeiten. Ein weiterer Ansatz ist die Abbildung externer Individuen in einem Haushalt, z.B. durch die Integration von Haushaltshilfen, da diese die Abläufe und auszuführenden Aktivitäten stark beeinflussen. Durch die Einbindung von Haushaltshilfen versuchen Wang und Li bisherige Intra-Haushaltsmodelle, die sich mit Aktivitäten- und Tourenplanung beschäftigen, zu ergänzen (vgl. [170], Wang u. Li).

In der vorliegenden Arbeit werden erst einmal lediglich individuelle Entscheidungen abgebildet. Es wird jedoch ein Rahmen zur Verfügung gestellt, der eine erste einfache Einbindung von Gruppenentscheidungen erleichtern soll. Gemeinsame Tätigkeiten sind derzeit im vorliegenden Modell nur innerhalb eines Haushalts möglich, wenn die Haushaltsmitglieder sich im Haushalt befinden. Weiterhin können Agenten mit zu geringem Alter (Kleinkinder) keine eigenen Entscheidungen treffen. Sie unternehmen sozusagen gemeinsame Tätigkeiten mit einem zugeordneten älteren Agenten. Zu guter Letzt kann eine gemeinsame Tätigkeit aus individuellen Tätigkeitsentscheidungen interpretiert werden, z.B. wenn es nur einen Fernseher im Haushalt gibt und mehrere Mitglieder des Haushaltes sich zur gleichen Zeit für die Alternative Fernsehen entscheiden.

## 5.4 Modell zur Abschätzung veränderter Energieverbräuche unter Berücksichtigung städtischer Formen und veränderter Zeitbudgets

In diesem Kapitel wird die praktische Umsetzung einer auf den urbanen Raum bezogenen Tagesaktivitätensimulation vorgestellt. Zunächst wird der Modellierungshintergrund beschrieben und eine kurze Modellübersicht gegeben. Darauf aufbauend werden Grenzen des Modells aufgezeigt. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der Modelleingaben und der Modellverarbeitung. Auf die dabei verwendeten einzelnen Modellklassen wird, um ein besseres Verständnis für die Modellierung zu gewährleisten, in eigenen Abschnitten näher eingegangen. Den Abschluss bildet die Vorstellung von Simulationsergebnissen und die Beurteilung der Mikrosimulation.

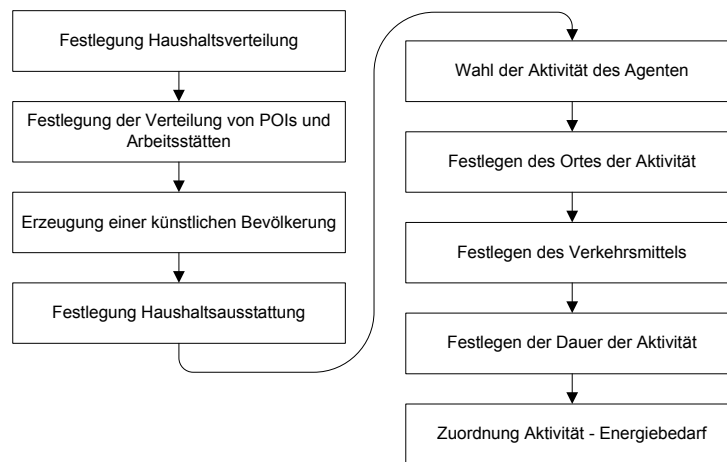
### 5.4.1 Modellübersicht

Die Umsetzung des Modells wurde in der Programmiersprache C# vorgenommen. Da die Agenten mit Eigenschaften und Methoden ausgestattet werden, wurde ein objekt-orientierter Ansatz für die Programmierung gewählt. Des Weiteren sind objektorientierte Paradigmen wie z.B. Datenkapselung für die Modellierung von Bedeutung. Als Programmierungsumgebung wird Microsoft Visual Studio (C# Express Edition 2008) verwendet, was durch die Firma Microsoft kostenfrei zur Verfügung gestellt wird. Als Softwareplattform dient das Microsoft Net Framework 3.5. Die Modellierung wurde dabei als Konsolenanwendung umgesetzt. Neben der kostenfreien Entwicklungsumgebung wurde das Modell auch aufgrund der guten Dokumentationsmöglichkeiten in C# umgesetzt. So ist C# nicht nur für die praktische Anwendungsprogrammierung geeignet (dies wäre z.B. Visual Basic auch), sondern bietet darüber hinaus durch den gelieferten Compiler die Möglichkeit automatisch eine XML-Dokumentationsdatei anzulegen, ohne dass der Programmierer Kenntnis von XML haben muss. Methoden sind im Quellcode durch Tags wie z.B. *summary* oder *param* beschreibbar. Sie dienen in diesem Fall dem Dokumentieren des Zwecks und der zu übergebenden Parameter. Dies erleichtert zukünftige Abänderungen und Erweiterungen enorm, da man sich ohne den Quellcode zu kennen, im Objektbrowser die Methodenbeschreibung (die im Hintergrund als XML-Dokument abgespeichert ist) ansehen kann.

Die Mikrosimulation ist mit einem GIS in einfacher Weise gekoppelt (vgl. Abb. 5.1 ). Einerseits werden Daten, die im GIS gehalten werden, der Simulation zugänglich gemacht und andererseits können Ergebnisse der Simulation mit Hilfe des GIS visualisiert und weiter analysiert werden. Dazu können Modellergebnisse in ein GIS lesbares Format exportiert werden.

Die abzuarbeitenden Schritte für einen Simulationsdurchlauf sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

**Abbildung 5.4:** Ablauf der Modellierung



Das Kernstück der Simulation stellt die Generierung von Aktivitäten während eines Zeitraumes von 24 Stunden dar. Dabei wird die Wahl der Aktivitäten durch verschiedene Randbedingungen beeinflusst. Der Ablauf der Simulation umfasst die Schritte: Einlesen der aus dem GIS stammenden Daten, Zuordnung von Agenteneigenschaften, Festlegen der Haushaltsausstattung sowie die Bestimmung der Aktivitätenprogramme der Agenten. Mit den Entscheidungen der Agenten für Aktivitäten sind die Entscheidung über den Ort der Aktivität und die Dauer der Aktivität verbunden. In einem weiteren Schritt werden die gewählten Aktivitäten, sofern dies möglich ist, mit Energiebedarfen assoziiert. Die ersten beiden Schritte entsprechen der Modelleingabe und werden im Abschnitt 5.4.5 näher behandelt. Die anschließenden Schritte der Zuordnung von Agenten- und Haushaltseigenschaften können als Vorverarbeitung der eigentlichen Simulation angesehen werden. Sie werden im Abschnitt 5.4.6 beschrieben. Die eigentliche Verarbeitung, also die Tagesaktivitätengenerierung, ist in Abschnitt 5.4.8 dargelegt.



In den folgenden Kapiteln 5.4.2 bis 5.4.4 wird die Auflösung und Abgrenzung des Modells näher beschrieben.

### 5.4.2 Räumliche Auflösung des Modells

Die räumliche Auflösung des Modells ist durch die aus dem GIS stammenden Koordinaten bestimmt. Dies sind vor allem die räumlichen Koordinaten der Haushalte und die Koordinaten weiterer Punkte (Arbeitsplätze, Restaurants, ...), die als Aktivitätenstandorte von Bedeutung sind. Übertragen auf reale Anwendungsbeispiele ist somit die Beachtung administrativer Grenzen für Simulationen nicht notwendig. Für umgesetzte Simulationsdurchläufe wird eine räumliche Ausdehnung vorgegeben, so dass Aktivitäten nur innerhalb dieses Gebietes ausgeführt werden.

Das Stadtmodell ist so allgemein gehalten, dass prinzipiell Städte verschiedener Größenklassen modelliert werden können. Auf Grund komplexerer Beziehungen als auch einer aufwendigeren Datenbeschaffung die mit einem vermehrten Berechnungsaufwand einhergeht, ist das Stadtmodell jedoch für zu große Städte derzeit eher weniger geeignet. Zu kleine Städte sind als Untersuchungsraum wegen der geringen Infrastrukturausstattung ebenfalls nicht so gut geeignet. Somit sind akzeptable Ergebnisse eher für mittlere Städte (Bevölkerung von ca. zehn- bis hunderttausend Einwohnern) zu erwarten. Energieströme können sowohl in real existierenden Städten als auch in rein fiktiven Städten untersucht werden.

### 5.4.3 Zeitliche Auflösung des Modells

Das Modell kann zu den kurz- bis mittelfristigen Modellen gerechnet werden. Der Simulationszeitraum beträgt 24 Stunden. Die Simulation kann einen derzeitigen oder einen in der Zukunft liegenden Tag abbilden. Unter Zukunft ist dabei nicht ein direkter Zeitpunkt zu verstehen, sondern vielmehr eine Simulation unter Randbedingungen, wie sie in der Zukunft vorstellbar ist.

Viele Aktivitäten abbildende Modelle, wie auch das hier vorgestellte Modell, beziehen sich auf einen Zeitraum von 24 Stunden, obwohl Abhängigkeiten zwischen Tagen existieren. So sind ausgewählte Tätigkeiten nur im Zusammenhang mit Wochen, Monaten oder sogar Jahren (z.B. Wechsel des Wohnsitzes) sinnvoll zu betrachten. In der kurzfristigen Perspektive werden in diesem Zusammenhang Modelle eingesetzt, die mehrere



Tage (multi-day modeling) berücksichtigen. Diese Modelle können helfen, Rhythmen in Aktivitätsmustern zu finden, die Variationen von Tag zu Tag zu beobachten und Abhängigkeiten zwischen den Tagen zu untersuchen (vgl. z.B. [18], Bhat u. a.). Für die hier durchgeführte 24 h Simulation, wird implizit vorausgesetzt, dass Tage unabhängig voneinander sind. Dies stellt aber im Kontext dieser Arbeit keine große Einschränkung dar, da im vorliegenden Fall immer nur ein Tag betrachtet wird.

#### 5.4.4 Inhaltliche Abgrenzung

Die vorliegende Simulation untersucht die Tagesaktivitäten einer Stadtbevölkerung. Die Aktivitäten werden, wo dies möglich ist, mit Energieverbräuchen assoziiert. Für die Bestimmung von Energieverbräuchen wird hier in erster Linie Elektrizität berücksichtigt. Weiterhin werden für Außer-Haus-Aktivitäten Entfernungen betrachtet. Diese können mit Treibstoffbedarfen verknüpft werden. Prinzipiell kann mit einem Modell, wie dem vorliegenden, auch versucht werden, den Wärmebedarf von Haushalten zu schätzen. Der Wärmebedarf wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht berücksichtigt und bleibt zukünftigen Implementierungen vorbehalten<sup>85</sup>. Bei der Modellierung werden ausschließlich Haushalte betrachtet, so dass der Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor (GHD-Sektor) aber auch die Industrie nicht implementiert wurden<sup>86</sup>. Weiterhin ist anzumerken, dass abgesehen vom Mobilitätsbereich nur der direkte Energieverbrauch Beachtung fand<sup>87</sup>. Betrachtet man die absoluten Werte des direkten und des indirekten Energiebedarfes, so zeigt sich aber die hohe Bedeutung dieser Unterscheidung für den Haushaltssektor. Laut des statistischen Bundesamtes betrug der indirekte Energieverbrauch für private Haushalte zur Herstellung konsumierter Waren und Dienstleistungen für das Jahr 2003 6000 PJ. Dies entspricht dem 1,5-Fachen des direkten Energieverbrauches für dasselbe Jahr.

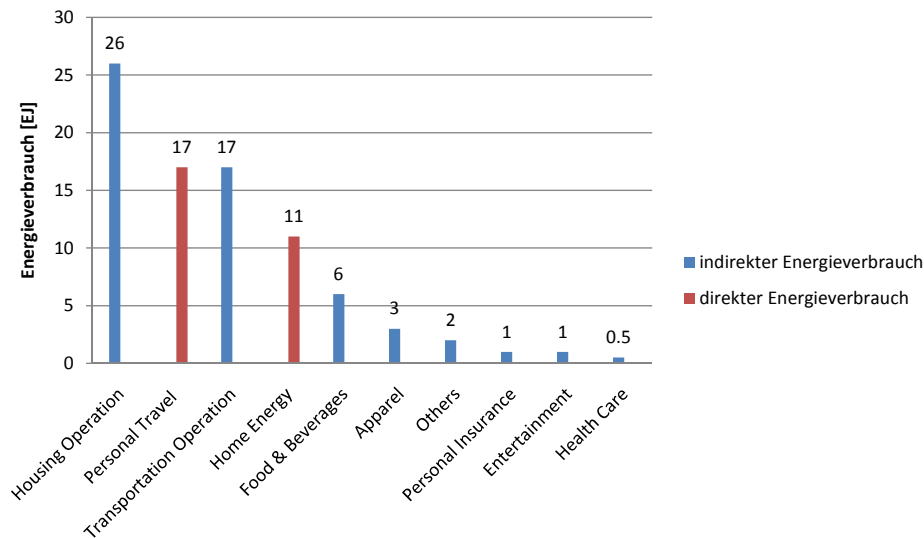
---

<sup>85</sup>Da der Wärmebedarf relativ unabhängig von den ausgeführten Aktivitäten der Agenten ist, wurde er im Simulationsmodell vorerst nicht berücksichtigt. Eine zukünftige Implementierung ist vorgesehen.

<sup>86</sup>Der GHD-Sektor wurde aufgrund der Nichtverfügbarkeit von adäquatem Datenmaterial in dieser Modellierung nicht implementiert.

<sup>87</sup>Der indirekte Energieverbrauch beinhaltet global produzierte Güter und Dienstleistungen und wurde daher aufgrund der lokalen Ausrichtung dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Weiterhin sprach die Betrachtung des Energieverbrauches in einem Zeitraum von 24 Stunden gegen eine Implementierung des indirekten Energieverbrauches.

**Abbildung 5.5:** Energieverbrauch von Konsumenten in den USA



Quelle: nach Bin und Dowlatabadi (vgl. [20])

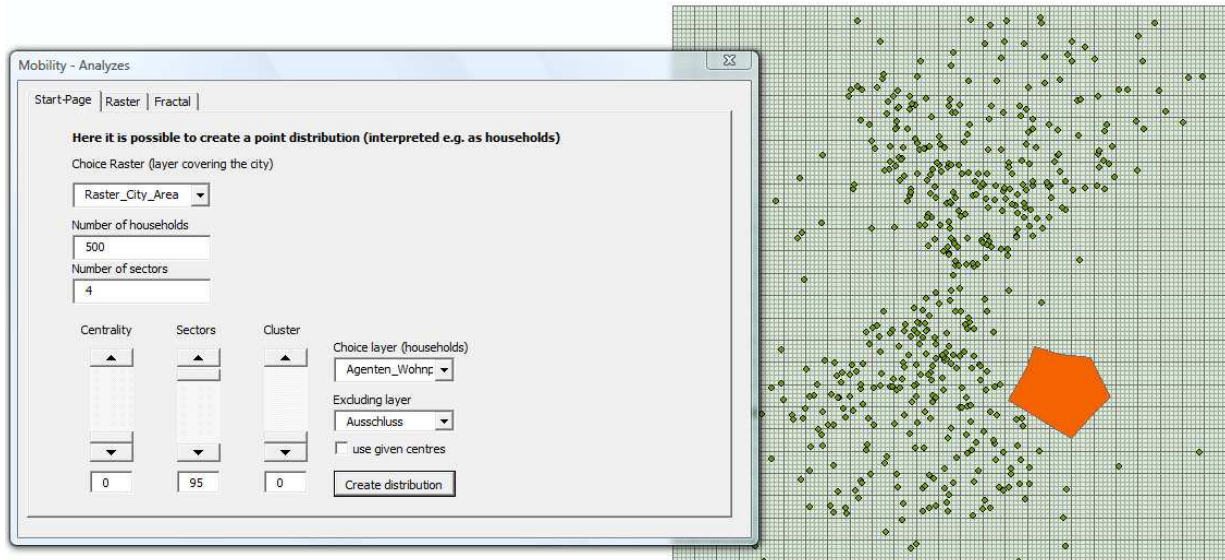
In Abbildung 5.5 sind die Bereiche der Energieverbräuche von Konsumenten der USA für das Jahr 1997 angegeben. Nach der Abbildung sind der Haushalts-, der Transport- und der Nahrungsmittelbereich die wichtigsten Sektoren des indirekten Energieverbrauches (vgl. [20], Bin u. Dowlatabadi). Der indirekte Energieverbrauch übersteigt nach Angaben von Bin und Dowlatabadi den direkten Energieverbrauch um Faktor 2. Eine Studie von Biesiot und Noorman beschäftigt sich mit Haushaltsenergieverbräuchen in den Niederlanden (vgl. [19], Biesiot u. Noorman). Sie zeigt, dass der indirekte Energiebedarf während des Zeitraumes 1950-1990 zwischen 50% – 60% des gesamten Energiebedarfs betrug.

#### 5.4.5 Modell-Eingabe

Als Eingabedaten werden für die Mikrosimulation Daten aus Textdateien (.txt) eingelesen. Die Daten werden in einem GIS (im vorliegenden Fall ArcGis) unter Verwendung von ArcObjects generiert bzw. im GIS gehalten und mittels Visual Basic for Applikation (VBA) Skripten als Textdateien exportiert. Die Daten beschreiben dabei die urbane Form und dienen als Grundlage für die auf sie zugreifende Mikrosimulation.

Abbildung 5.6 zeigt ein im GIS speziell für diese Arbeit implementiertes GUI mit dem urbane Formen generiert werden können. Die Programmierungen basieren wiederum auf VBA.

**Abbildung 5.6:** Erzeugung urbaner Formen für die Mikrosimulation



Wie in der obigen Abbildung ersichtlich ist, wird ein Grundraster (Stadtfläche) vorgegeben. Dieses Raster ist im vorliegenden Fall quadratisch, kann prinzipiell jedoch beliebig sein. Für die Stadtflächenerzeugung steht ein eigenes Skript zur Verfügung, mit dem die Rasterbreite als auch die Rasterzellenzahl in x- und y-Richtung festgelegt werden können<sup>88</sup>. Das Skript erzeugt aus den gegebenen Informationen eine Polygon Shapedatei. In diesem Raster werden eine vorgegebene Anzahl von Punkten zufällig verteilt. Diese Punkte werden als die Haushalte der jeweiligen Stadt interpretiert und spiegeln mit ihrer Verteilung die urbane Form wieder. Da die Haushalte nicht gänzlich zufällig über die Stadt verteilt sein sollen, sind in diesem Zusammenhang einige Einflussmöglichkeiten implementiert worden. An dieser Stelle sei noch einmal an die klassischen Landnutzungsmodelle erinnert:

---

<sup>88</sup>Der Begriff Raster bezieht sich auf die Einteilung der Stadtfläche in Zellen, was nichts mit dem Begriff Raster aus Rastergrafiken zu tun hat. Vielmehr handelt es sich bei dem Grundraster um Vektordaten.

- Ringmodell (E.W. Burgess 1925)
- Sektorenmodell (H. Hoyt 1939)
- Mehrkerne-Modell (C.D. Harris und E.L. Ullmann 1945)

In Städten existieren häufig Sektoren, die dicht bzw. weniger dicht besiedelt sind. Es gibt daher, wie in Abbildung 5.6 ersichtlich, die Möglichkeit eine Anzahl von Sektoren festzulegen sowie einen Schieberegler, der die Bedeutung der Sektoren widerspiegelt. In der Abbildung 5.6 wurde die Sektorenanzahl auf 4 und die Gewichtung auf 95% festgelegt. Das bedeutet, dass fast alle Punkte in 2 Sektoren verteilt werden. Die Sektoren sind abwechselnd für Wohnraum geeignet bzw. ungeeignet, wobei der erste Sektor bei einem zufällig gewählten Winkel beginnt. Zur Abbildung dichter und weniger dicht besiedelter Städte, steht ein weiterer Schieberegler (Zentralität) zur Verfügung. Um das Vorhandensein von mehreren Kernen abzubilden, die in der Realität z.B. durch das Zusammenwachsen historisch getrennter Siedlungen entstanden sein können, gibt es einen letzten Schieberegler (Cluster). Weiterhin ist es möglich Kerne vorzugeben (Punkte aus einem vorgegebenen Punkt-Shapefile). Zu guter letzt können Gebiete (beliebige Polygone) vorgegeben werden, die für die Bebauung (Punkte im Stadtgebiet) nicht zugänglich sind. Dies könnten im realen Stadtbild z.B. Stadtteiche bzw. Stadtwälder sein. In der Abbildung 5.6 stellt das orangene Polygon ein solches Ausschlussgebiet dar. Durch das beschriebene Vorgehen besteht die Möglichkeit, verschiedene künstliche Stadtformen und Stadtgrößen zu generieren. Allerdings können in der derzeitigen Implementierung ringförmige Strukturen schlecht abgebildet werden und auch Einflussfaktoren, wie die topographische Situation, werden nicht beachtet. Die topographische Situation könnte zum Teil durch die Wahl der angesprochenen Ausschlussgebiete berücksichtigt werden. Für die zukünftige Weiterentwicklung des Modells ist es denkbar, Gebiete unterschiedlicher Eignung statt reiner Ausschlussgebiete zu verwenden. Nach der Festlegung der Stadtfläche und der Wohnorte müssen im Folgenden die Arbeitsstätten und die POIs (Point of Interests, dazu zählen Einkaufsstätten, Kinos, ...) verteilt werden. Die Arbeitsstättenkoordinaten wie auch die Koordinaten der POIs werden für diese Mikrosimulation nicht automatisiert generiert, sondern per Hand im GIS bestimmt (digitalisiert)<sup>89</sup>.

Neben der Nutzung künstlich erzeugter Stadtstrukturen ist es prinzipiell möglich, reale Daten zu integrieren (z.B. reale Adresspunkte, Straßenlayer). Obwohl dies in dieser

---

<sup>89</sup>Es wurde sich für dieses Vorgehen entschieden, da die Standortwahl von Arbeitstätten und POIs im Stadtgebiet von vielfältigen Einflussfaktoren abhängt, die in dieser Arbeit derzeit nicht berücksichtigt werden können.

Arbeit keine Anwendung findet, könnten in eine Mikrosimulation verschiedene Informationen aus vorhandenen GIS-Datenbeständen einfließen. Neben den Wohndaten (z.B. amtliche Daten des Liegenschaftskatasters) könnte ein GIS Informationen über die Lage der POIs, der Arbeitsstätten (z.B. von Daten aus Industrie- und Handelskammern) sowie über die räumliche Lage und Ausdehnung der Stadt liefern. Da sich einige Arbeitsstätten aber bevorzugt in bestimmten Regionen (z.B. Stadtzentrum) befinden, ist es zukünftig denkbar diese automatisiert über das Stadtgebiet zu verteilen. Die Anzahl urbaner Versorgungseinrichtungen lässt sich über Potenzgesetze (power law) abschätzen (vgl. [91], Kühnert u. a.). Dieses kann als  $X_i = X_0 * N_i^\beta$  (wobei  $N_i$  die Bevölkerungsgröße ist) beschrieben werden. Nach Kühnert et al. ([91], Kühnert u. a.) ist die Potenzfunktion linear wachsend für Poststellen, Apotheken bzw. Krankenhäuser, sublinear wachsend für Tankstellen bzw. Autohändler und superlinear wachsend für Restaurants bzw. Ärzte. Denkbar wären auch weiterführende Datenexporte aus einem GIS, wie z.B. Stadtklimadaten, Informationen über vorhandene Gewässer oder Höhenmodelle<sup>90</sup>. In dem für diese Arbeit erstellten Modell wurde für die Erfassung von Höhenwerten eine statische Klasse in die Mikrosimulation integriert. Diese nutzt die Google Elevation API (Application programming interface) und könnte für weiterführende Simulationen genutzt werden<sup>91</sup>.

Langfristig ist es vorgesehen, ein solches Simulationsmodell auf reale Siedlungen anzuwenden. Dies bietet auch den Vorteil, dass ein auf reale Siedlungen angewandetes Modell besser validiert werden kann. Um reale Siedlungen abzubilden, ist eine realitätsnahe Verteilung von Haushalten notwendig. Hierfür könnten z.B. Fernerkundungsdaten zur Stadtraumcharakterisierung herangezogen werden, so dass z.B. Einzelhaussiedlungen von Blockrandbebauungen unterschieden werden können (vgl. [181], Wurm u. Taubenböck). Ein weiterer Ansatz um reale Siedlungsdaten zu erhalten, ist das Geokodieren (geocoding) beziehungsweise das umgekehrte Geokodieren (reverse geocoding). Beim Geokodieren werden Adressen auf Koordinaten abgebildet. Im umgekehrten Fall wird zu Koordinaten, die am dichtesten liegende Adresse gesucht. Die Google Maps-API bietet für jeden Nutzer die Möglichkeit bis zu 2500 HTTP-Geokodierungsabfragen täglich zu stellen. Es muss jedoch darauf hingewiesen, dass die Google Anfrageergebnisse nur für Google Karten genutzt werden können. Für weitere Verwendungen, auch im Forschungsbereich, ist eine explizite Erlaubnis von Google notwendig. Im Simulationsmodell wurde eine Geokodierung, die auf Google basiert, implementiert, so dass diese möglicherweise zukünftig genutzt werden kann. Informationen zu Adressen könnten aus Quellen wie

---

<sup>90</sup>Bei Höhenmodellen können z.B. GTOPO30 und SRTM Daten frei bezogen werden.

<sup>91</sup>Hierzu ist eine explizite Genehmigung von Google notwendig.

Telefonbüchern oder den Gelben Seiten entnommen werden. Weiterhin könnte als Datenquelle Openstreetmap<sup>92</sup> verwendet werden.

Im Rahmen der Programmierung wurde eine Prozedur geschrieben, die mit Hilfe von Google die Nutzungen für einen festgelegten Ort sucht (z.B. Restaurants). Aus einer von Google zurückgegeben kml-Datei werden dabei die Adressen gefiltert und mit Hilfe der Geokodierung deren Koordinaten bestimmt. Die Namen, Adressen und Koordinaten dieser Analyse werden in eine Textdatei bzw. in ein dbase Datenbankformat<sup>93</sup> gespeichert. Bis auf Ausnahmen werden zu allen Adressen Koordinaten gefunden. Es ist daher notwendig, die gefundenen Daten auf Aktualität und Vollständigkeit zu prüfen, bevor sie für die Simulation nutzbar gemacht werden können. Des Weiteren sei angemerkt, das Google suchbegriffsverwandte Objekte bestimmt (bspw. Cafés statt Restaurants). Die Erschließung der Richtigkeit der Suchergebnisse muss also über den Namen erfolgen bzw. unter Zuhilfenahme weiterer Quellen.

Wie eingangs erwähnt, zeigen die hier beschriebenen Implementierungen Möglichkeiten der Datenerfassung durch die Nutzung des World Wide Webs auf. Eine wirkliche Nutzung dieser Datenquellen fand, unter anderem auf Grund der Zielstellung der Arbeit und wegen fehlenden Nutzungsrechten, nicht statt.

Das nächste Kapitel behandelt die notwendigen Schritte im Vorfeld der eigentlichen Simulation von Tagesaktivitäten. Hierzu ist unter anderem die Erfassung der Haushaltsstruktur (Haushaltsgrößen und Einkommensklassen) zu verstehen.

#### 5.4.6 Modell-Vorverarbeitung

Nach dem Einlesen der Eingabedaten, also der Generierung der Stadtstruktur mit den jeweiligen Haushalten und den POIs, ist es notwendig weitere Schritte durchzuführen, bevor die eigentliche Tagesaktivitätengenerierung stattfinden kann. Diese Schritte beinhalten die Zuordnung von Eigenschaften zu den Agenten und die Festlegung der Haushaltsstruktur. Dabei ist es das Ziel, die Verteilung soziodemographischer Merkmale, wie

---

<sup>92</sup>Hier sind die einzelnen Daten jedoch zu prüfen, da die Datenqualität erheblich abweichen kann.

<sup>93</sup>Dbase wurde gewählt, weil es am einfachsten in ArcGIS eingelesen werden kann (Add xy data). Das Speichern der dbf-Dateien wird mit Hilfe des dbfExporters umgesetzt. Der dbfExporter ist eine in C# geschriebene Bibliothek, die unter der LGPL veröffentlicht ist. Der Vorteil dabei ist, dass keine ODBC Treiber benötigt werden.



die Altersstruktur, die Haushaltsgrößen und die Einkommensklassen, so gut wie möglich abzubilden bzw. für eine künstlich erzeugte Stadtstruktur plausible Zuordnungen zu liefern.

In der Praxis sind oft verschiedene Randverteilungen für einzelne Merkmale bekannt (z.B. Einkommensverteilung oder Verteilung der Haushaltsgrößen), wobei aber nicht klar ist, wie die gemeinsame Verteilung beschaffen ist. Für die Festlegung der gemeinsamen Verteilung können eventuell vorhandene Stichproben genutzt werden. Die Bestimmung einer gemeinsamen Verteilung hinsichtlich der Randverteilungen stellt eine grundlegende Aufgabe der Vorverarbeitung dar. Dies ist notwendig, um beispielsweise festzulegen, wie viele Einpersonenhaushalte einer niedrigen Einkommensklasse angehören. In diesem Kontext wird im englischen Sprachgebrauch der Begriff *Population Synthesizer* verwendet.

Das meist genutzte Verfahren für die Abbildung gemeinsamer Merkmalsverteilung ist das *Iterative Proportional Fitting* (IPF). Dieses wurde in dem vorliegenden Modell als Funktion einer Klasse für 2 bzw. 3 Dimensionen bei Vorhanden- oder Nicht-Vorhandensein einer Startverteilung<sup>94</sup> implementiert. Nach Müller und Axhausen hat das IPF dabei die folgenden beiden positiven Eigenschaften (vgl. [116], Mueller u. Axhausen):

- Kreuzproduktverhältnisse bleiben erhalten
- Minimierung der relativen Entropie<sup>95</sup>

Die relative Entropie ist dabei durch die Kullback-Leibler-Distanz berechenbar.

$$D_{KL} = \sum_x P(x) \log_2 \frac{P(x)}{Q(x)}$$

Die Entropieminimierung ist u.a. bei Ireland und Kullback beschrieben ([80], Ireland u. Kullback). Ein neuerer Ansatz, der es durch eine Heuristik erlaubt, simultan Haushalts- als auch Personenkategorien anzupassen, wurde durch Ye et al. vorgestellt (vgl. [183], Ye u. a.). Dieses *Iterative Proportional Updating* (IPU) wurde ebenfalls in das Simulationsmodell implementiert. Die beiden implementierten Verfahren dienen dazu, zukünftige Abbildungen realer Stadtverhältnisse zu ermöglichen.

---

<sup>94</sup>Diese kann aus einer Stichprobe gewonnen werden.

<sup>95</sup>Relative Entropie: Maß für die Unähnlichkeit von Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Da die Simulation in dieser Arbeit nur für fiktive Gegebenheiten getestet wird, liegt das Augenmerk der Vorverarbeitung hauptsächlich darauf einen sinnvollen, d.h. plausiblen Ausgangszustand zu generieren. Aus dem GIS eingelesene Daten beinhalten für die Haushalte lediglich Informationen über die Lage in Form von Koordinaten sowie über die Haushaltsgröße durch die entsprechende Anzahl der Bewohner. In dem Modell wurde eine Klasse Agenten implementiert, die Zugriff auf alle vorhandenen Agenten (Instanzen der Klasse Agent) besitzt und vordergründig die Aufgabe hat, Eigenschaften der Agenten zu verändern. Hierbei muss der Unterschied zwischen der Klasse Agenten und der Klasse Agent beachtet werden. Die Klasse Agent mit ihren Eigenschaften wird in Kapitel 5.4.7 beschrieben.

Zu Beginn, wenn von einzelnen Agenten Instanzen gebildet werden, besitzen die Eigenschaften der Agenten keine sinnvollen Werte, da deklarierte Variablen mit Standardwerten initialisiert werden. Unter Eigenschaften sind in diesem Zusammenhang vor allem Alter und Geschlecht zu verstehen. Das Alter wird den Agenten auf Basis der Haushaltsgröße stochastisch (gleichverteilt aus festgelegten Altersbereichen) zugeordnet. Die Zuordnung plausibler Werte bedeutet in diesem Zusammenhang beispielsweise, dass bei Einpersonenhaushalten der betreffende Agent ein vorgegebenes Mindestalter überschreiten muss. Bei Zweipersonenhaushalten sollte die überwiegende Mehrheit aus einem männlichen und einem weiblichen Agenten bestehen. Mehrpersonenhaushalte werden fast ausschließlich als klassische Familien (2 Erwachsene plus Kinder) angesehen. Dabei erhalten die Eltern ein ähnliches Alter. Zur Gewährleistung plausibler Ergebnisse, ist das Alter der Kinder lose an das Alter der Erwachsenen gekoppelt, um zu vermeiden, dass z.B. Eltern im Alter von zwanzig Jahren, fünfzehnjährige Kinder haben. Durch dieses Vorgehen werden reale demographische Situationen und Haushaltsstrukturen zwar nicht gänzlich erfasst (z.B. werden Dreigenerationenhaushalte, betreutes Wohnen, ... nicht abgebildet), aber es wird eine sinnvolle Ausgangssituationen für anstehende Simulationen generiert.

Nach der Festlegung von Alter und Geschlecht werden den Agenten durch weitere Methoden Arbeitsplätze bzw. andere Agenten als Bekannte zugeordnet. Dabei ist die Reihenfolge der Methodenausführung wichtig, weil das Alter einen Einfluss auf die Zuordnung eines Kindergartenplatzes, einer Schule oder eines Arbeitsplatzes hat. Außerdem werden ab einem festgelegten Alter (Rentenalter) der Agenten keine Arbeitsplätze mehr zugeordnet. Analog zu der Klasse Agenten wurde eine Klasse Haushalte geschaffen, die eine Liste über alle städtischen Haushalte besitzt. Die Aufgabe dieser Klasse ist es, Methoden



bereitzustellen, die die Eigenschaften aller Haushalte manipulieren können. So werden Methoden bereitgestellt, die für alle Haushalte z.B. das Haushaltseinkommen oder auch die Haushaltsausstattung festlegen. Hierbei muss wiederum der Unterschied zwischen der Klasse Haushalte und der Klasse Haushalt beachtet werden. Die Klasse Haushalt mit ihren Eigenschaften wird in Kapitel 5.4.7 beschrieben.

Die Festlegung der Haushaltsausstattung stellt einen weiteren Schritt der Vorverarbeitung dar. Hierzu werden Daten aus öffentlichen Statistiken herangezogen. Darauf aufbauend erfolgt die Zuordnung zu den Haushalten stochastisch nach den gegebenen Wahrscheinlichkeiten. Die Ausstattungsgrade von Haushalten in Deutschland sind im Folgenden für ausgewählte Technologien aufgelistet.

• Elektroherd	84,0%
• Fahrrad	79,5%
• Fernseher	94,1%
• Geschirrspülmaschine	62,5%
• Kühlschrank	98,6%
• Personal Computer	75,4%
• Personenkraftwagen	77,1%
• Waschmaschine	95,2%
• Wäschetrockner	38,5%

Die angegebenen Daten wurden der regelmäßig erhobenen Einkommens- und Verbrauchsstichprobe vom statistischen Bundesamt entnommen (vgl. [14], Behrends u. Kott). Der Bezugszeitpunkt ist der erste Januar 2008. Der in der Aufzählung genannte Ausstattungsgrad mit Waschmaschinen wurde in der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe aus dem Jahr 2003 erhoben (vgl. [13], Behrends u. a.). Von Eberle stammt der Ausstattungsgrad mit Elektroherden (vgl. [45], Eberle). Die in der Aufzählung genannten 84% beziehen sich auf das Jahr 2004.

Der Ausstattungsgrad von Haushalten kann erheblich vom durchschnittlichen Ausstattungsgrad abweichen. Diese Abweichungen sind insbesondere von der Haushaltsgröße und dem Haushaltseinkommen abhängig. So reicht der Ausstattungsgang mit PCs von 56,0% (bei einem monatlichen Haushaltsnettoeinkommen von unter 900 Euro) bis zu

96,8% (bei einem monatlichen Haushaltsnettoeinkommen von 5000 bis unter 18000 Euro) (vgl. [14], Behrends u. Kott). Die Ausstattung mit PKWs variiert von 56,9% in Einpersonenhaushalten bis zu 95,9% in Fünf- und Mehrpersonenhaushalt (vgl. [153], Statistisches Bundesamt). Das statistische Bundesamt veröffentlicht weiterhin Zahlen zu Ausstattungsgraden hinsichtlich Ost- und Westdeutschlands, der einzelnen Bundesländer, der sozialen Stellung, des Alters des Haupteinkommensbezieher als auch des Haushaltstyps oder in Bezug auf die Wohnsituation, die zwischen Mietwohnung bzw. Wohneigentum unterscheidet (vgl. z.B. [153], Statistisches Bundesamt).

Mit der Festlegung der Haushaltsausstattung ist die Vorverarbeitung der Simulation abgeschlossen. Im nächsten Kapitel werden die einzelnen implementierten Klassen genauer erläutert, bevor in Kapitel 5.4.8 die eigentliche Hauptverarbeitung im Modell dargestellt wird.

### 5.4.7 Modellklassen

Da die Programmierung dem objektorientierten Ansatzes folgt, werden nun die implementierten Eigenschaften und Methoden der wichtigsten Klassen beschrieben.

#### 5.4.7.1 Klasse Agent

Die Agenten in der Simulation sind durch eine Reihe von Eigenschaften gekennzeichnet. Diese sind im Folgenden aufgelistet:

- |                                  |                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| • Agentenidentifikationsnummer   | • Einstellung                     |
| • Haushaltsidentifikationsnummer | • Mobilitätstyp                   |
| • Alter                          | • Aktuelle Position (Koordinaten) |
| • Geschlecht                     | • Liste_Tätigkeiten               |
| • Status                         | • Liste_Tätigkeitsdauer           |
| • Arbeitsplatz (Koordinaten)     | • Autoverfügbarkeit               |

Die aufgelisteten Eigenschaften sollen an dieser Stelle näher erläutert werden. Zuerst erhält jeder Agent eine Agentenidentifikationsnummer. Da jeder Agent zu einem Haushalt gehört, wird diese Information durch die Haushaltsidentifikationsnummer mitgespeichert. Der Hintergrund hierfür ist, dass Entscheidungen in der Realität nicht ausschließlich allein oder nur für sich selbst getroffen werden. Gerade in Haushalten wird oft gemeinsam geplant und gehandelt (z.B. Familienausflug). Da verhandelte Entscheidungsfindungen sehr komplex sind, ist es üblich, dass in Modellierungsansätzen Haushaltsentscheidungen durch einen ausgewählten Agenten (z.B. Hauptperson im Haushalt) getroffen werden. Bradley und Vosha listen einige Ansätze auf, in denen Haushaltsentscheidungen lediglich von einer Person (household heads) abhängig sind und somit andere Haushaltsmitglieder als aktive Entscheider nicht berücksichtigt werden (vgl. [27], Bradley u. Vovsha). Die Berücksichtigung von Hauptpersonen (household heads) ist nicht zwingend notwendig, jedoch auch vorteilhaft, um Personen mit ähnlichen Rollen im Haushalt vergleichen zu können (vgl. [129], Příbyl).

Durch die Eigenschaft Status wird die "berufliche Situation" der Agenten erfasst (z.B. Kleinkind, Schüler, arbeitslos, teilzeitbeschäftigt, vollzeitbeschäftigt oder Renter). Dies wird genutzt, um den Agenten gegebenenfalls eine Schule oder eine Arbeitsstätte zuzuordnen. Andererseits beeinflusst die Eigenschaft Status auch die zeitliche Verteilung von Tagesaktivitäten.

Das Merkmal Einstellung bezieht sich auf das Umweltbewusstsein der Agenten. In der derzeitigen Implementierung wird Einstellung sehr vereinfacht nur binär in umweltbewusst und weniger umweltbewusst unterteilt. In diesem Zusammenhang kann auf die in Kapitel 5.3.3 angesprochenen Sinus Milieus bzw. Lebensstile verwiesen werden. Zukünftig könnte das Merkmal Einstellung Lebensstile bzw. Milieus adäquater erfassen. Es sind jedoch noch weitere Forschungsarbeiten notwendig, um die Themen Einstellung, Zeitnutzung und Energiebedarf sinnvoll miteinander verbinden zu können.

Die Eigenschaft Mobilitätstyp wurde eingefügt, da Personen grundsätzlich ein unterschiedliches Mobilitätsverhalten aufweisen, was gut klassifizierbar ist. So unterscheidet Kramer die folgenden qualitativen Mobilitätstypen (vgl. [98], Kramer):

- Unreflektierte/r PKW-Nutzer/in
- Rational/r Nutzer/in der Vielfalt
- ÖPNV-Nutzer/in und/oder Fahrradnutzer/in aus Ermangelung eines PKWs

- Autoverweigerer/in aus Überzeugung
- Emotionale/r Spontan-Entscheider/in

Diese Unterteilung stellte sich als trennscharf heraus, so dass in der durch Kramer durchgeführten Befragung die Teilnehmer relativ problemlos einem Mobilitätstyp zugeordnet werden konnten. Allerdings erheben die von Kramer bestimmten Mobilitätstypen keinen Anspruch auf Vollständigkeit (vgl. [98], Kramer).

Als Methoden können Agenten Entfernungen zu Zielorten bestimmen. Dafür wird die aktuelle Position als Agenteneigenschaft mitgeführt. Die Entfernungsbestimmung ist für die Verkehrsmittelwahl von Bedeutung. Weitere implementierte Methoden betreffen das Gedächtnis der Agenten. So gibt es eine Methode, mit der bestimmt wird, ob eine Tätigkeit schon einmal ausgeführt wurde. Außerdem ist es möglich abzufragen, ob in letzter Zeit, z. B. in den letzten 2 Stunden, eine bestimmte Tätigkeit vollzogen wurde. Dafür besitzt jeder Agent eine Liste, die alle bis zum aktuellen Zeitpunkt vollzogenen Tätigkeiten erfasst sowie eine Liste, die die Tätigkeitsdauern enthält. Die angesprochenen Methoden sind wichtig, um zukünftig anstehende Tätigkeitsentscheidungen beeinflussen zu können. Ziel ist es dadurch, unrealistische Tätigkeitsverläufe während des Tages zu vermeiden.

#### 5.4.7.2 Klasse Haushalt

Die Haushalte sind dadurch gekennzeichnet, dass sie sich aus einer bestimmten Anzahl von Haushaltsmitgliedern zusammensetzen und feste Koordinaten besitzen. Die Lage der Haushalte wird, wie erwähnt, aus einem GIS geliefert und über eine Textdatei eingelesen. Die Klasse Haushalte wird genutzt um Ausstattungen (Haushaltsausstattung) festzulegen, die den Agenten des Haushaltes prinzipiell zur Verfügung stehen. Den Haushalten werden, wie in Kapitel 5.4.8 beschrieben, Ausstattungen (Anzahl von PKWs, Anzahl Fernseher, Anzahl Computer, ...) zugeteilt. Daten zur Haushaltsausstattung können amtlichen Statistiken, wie der Einkommens- und Verbrauchsstatistik (EVS), die alle 5 Jahre erhoben wird, entnommen werden. Weitere Eigenschaften der Haushalte sind die verfügbare Wohnfläche sowie das Haushaltseinkommen. Die Wohnfläche kann zur Schätzung des Raumwärme- bzw. des Bedarfs an Energie für Beleuchtungszwecke herangezogen werden. Das Haushaltseinkommen ist der bedeutendste Faktor bei der Erklärung der Varianz des Gesamtenergiebedarfs von Haushalten (vgl. [168], Vringer u. a.).

Um in zukünftigen Modellierungen zusätzlich zum Strombedarf den Wärmebedarf abschätzen zu können, sollten Gebäudetypen (z.B. Einfamilienhaus, Reihenhaushaus) und der Sanierungsstand implementiert werden. Des Weiteren ist es denkbar, den Haushalten und damit den Agenten Milieus zuzuordnen.

#### 5.4.7.3 Klasse Umwelt

Der Mensch trifft seine Entscheidungen aus einem bestimmten Kontext heraus. Dabei sind auch Einflüsse aus der Umwelt der Agenten von Bedeutung. Im Modell wird unter Umwelt vereinfacht das Wetter, die Zeit sowie die Lage im Raum verstanden. Das Wetter wird nur binär in gut (sonniger Schönwettertag) bzw. schlecht (verregneter Tag) eingeteilt. Somit können Tage simuliert werden, an denen Außer-Haus-Aktivitäten bzw. Aktivitäten im Haus eine unterschiedliche Gewichtung erhalten. Des Weiteren wird die Verkehrsmittelwahl durch das Wetter beeinflusst. „... *it is shown that the weather clearly is a variable environmental factor that is able to trigger the execution of different scripts in people's mental maps*“ (vgl. [76], Hühnerbein u. a., S. 93). So sehen Menschen die gewöhnlicherweise mit dem Fahrrad fahren schlechtes Wetter als eine Ausnahmesituation an, in der dann beispielsweise der Bus benutzt wird (vgl. [76], Hühnerbein u. a.). Auch in den Untersuchungen von Kramer wurde die Witterung häufig als Entscheidungskriterium der Verkehrsmittelwahl genannt. Bei der Frage nach den wichtigsten Einflussfaktoren auf die Verkehrsmittelwahl, belegte die Witterung insgesamt den achten Rang unter zwölf Kriterien (vgl. [98], Kramer).

In der implementierten Klasse Umwelt beschreibt die Zeit den Tag des Jahres als auch, ob es sich bei dem zu simulierenden Tag um einen Wochen- bzw. einen Wochenendtag handelt. Mit Hilfe der Festlegung eines Tagesdatums kann somit als Typtag z. B. ein Sommer- oder Wintertag simuliert werden. Die geographische Lage (Koordinaten) lässt auf das Land oder die Klimazone schließen. In der vorliegenden Simulation wird die geographische Lage erst einmal ausschließlich dafür genutzt, um die Zeit des Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergangs näherungsweise zu berechnen. Die Lichtverhältnisse beeinflussen einerseits die Aktivitäten, andererseits muss mangelnder Lichteinfall durch Beleuchtung<sup>96</sup> und somit zusätzlichem Energieverbrauch kompensiert werden. Neben dem Sonnenauf-

---

<sup>96</sup>Der Bereich Beleuchtung hat nur einen sehr geringen Anteil am Endenergieverbrauch der Haushalte (ca. 1,5%). Die Tag-Nacht Komponente wurde aber in das Modell aufgenommen, da sie ein gutes Beispiel für die Einbeziehung eines GIS darstellt.

und Sonnenuntergang ist die Witterung (heiterer bzw. bewölkter Tag) die wichtigste Einflussgrösse auf die Beleuchtungszeiten (vgl. [76], Hühnerbein u. a.).

Die Berechnung der Zeiten für Sonnenauf- und Sonnenuntergänge erfolgt über die Zeitgleichung und die Bestimmung der Deklination der Sonne<sup>97</sup>. Die Zeitgleichung ist die Differenz von wahrer Ortszeit und mittlerer Ortszeit. Aus geographischen Koordinaten und der Datumsangabe kann die mittlere Ortszeit des Sonnenaufgangs bzw. Sonnenuntergangs näherungsweise berechnet werden. Da jedoch bei Zeiterfassungen (z.B. Zeitbudgetdaten) nicht die mittlere Ortszeit, sondern die Zonenzeit erfasst wird, ist es notwendig die Zeitzone des zu betrachtenden Ortes zu kennen. In einer groben Vorstellung beginnt eine neue Zeitzone alle 15°. Die genaue Aufteilung der Zeitzonen gestaltet sich etwas komplizierter (z.B. auf Grund administrativer Gegebenheiten)<sup>98</sup>. Die Zeitzonen für einzelne Koordinaten können z.B. durch den Webservice von GeoNames<sup>99</sup> abgefragt werden. In der vorliegenden Programmierung wird eine konkrete Zeitzone unter Zuhilfenahme von SharpMap<sup>100</sup> sowie Vektordaten von den Zeitzonen (Shapedatei) bestimmt<sup>101</sup>.

Durch die Erfassung von Sonnenauf- und -untergang sowie der Aufnahme der Witterungsverhältnisse wurden die wesentlichen Umweltbedingungen, die für diese Arbeit relevant sind, implementiert. Zukünftig könnten allerdings Tagesprofile des Temperaturverlaufes und der Feuchtigkeit der Luft vorgegeben werden, um den Tag differenzierter abbilden zu können. Einschränkend sei angemerkt, dass bei der letzten deutschen Zeitbudgeterhebung Witterungsdaten nicht erfasst wurden. Aus den vorhandenen Daten können Aktivitäten demnach zumeist nicht mit Daten über die Witterung assoziiert werden. Da keine genauen Orte erfasst wurden, kann dies auch nicht nachträglich geschehen. Daher kann anhand der Zeitbudgetdaten nicht überprüft werden, inwieweit die Witterung Aktivitätsmuster beeinflusst.

---

<sup>97</sup>Die vereinfachte Berechnung der Zeiten für Sonnenauf- und -untergang mit maximalen Abweichungen von wenigen Minuten erfolgte nach Angaben der Internetseite: <http://lexikon.astronomie.info/zeitgleichung/>

<sup>98</sup>Eine gute Abbildung der Zeitzonen findet sich z.B. bei Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Timezones2010.png>

<sup>99</sup>Dieser Service ist unter folgendem Link verfügbar: <http://www.geonames.org/export/webservices.html> - Die Ausgabe der Zeitzonen kann im XML oder JSON Format angefordert werden. Es wird darüber hinaus sogar die Zeit des Sonnenauf- und -untergangs ausgegeben.

<sup>100</sup>SharpMap stellt dynamische Bibliotheken zur Verfügung, welche unter der LGPL veröffentlicht wurden.

<sup>101</sup>Die eventuell vorhandene Umstellung auf Sommerzeit wurde für die Zeitzonen erstmal nicht betrachtet. Zeitzoneneinformationen sind unter Windows in der Registry gespeichert, so dass diese Informationen prinzipiell zur Verfügung stehen.

#### 5.4.7.4 Weitere Hilfsklassen

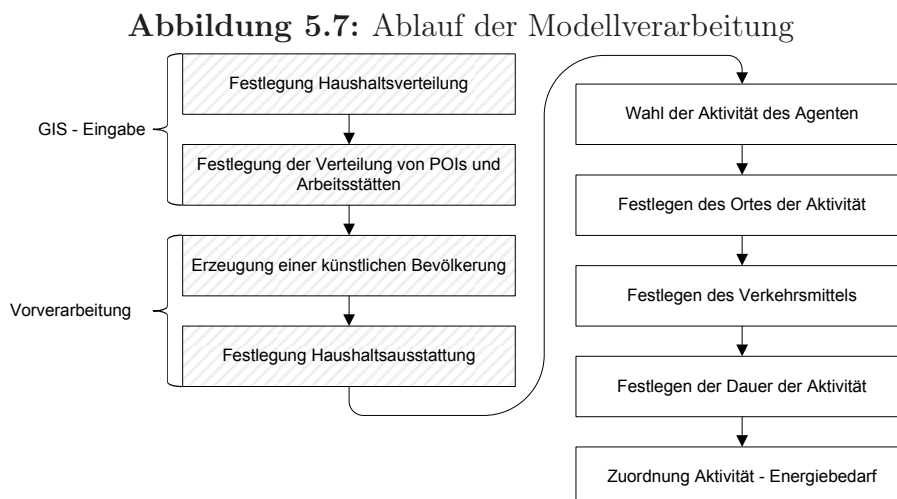
Um die Programmierung übersichtlicher und logisch konsistenter zu gestalten, wurden weitere Klassen implementiert. Diese Klassen betreffen das Einlesen bzw. Schreiben von Text- (.txt) und Datenbankdateien (.dbf), die Verwaltung der POIs, Zuordnungen, das Umrechnen von Zeitschritten in eine Uhrzeit oder auch die Generierung von Zufallszahlen.

Aufbauend auf den Informationen über die Vorverarbeitung und die einzelnen Klassen wird im nächsten Kapitel die eigentliche Modellverarbeitung beschrieben.

#### 5.4.8 Modell-Verarbeitung

Dieser Abschnitt erläutert insbesondere die Generierung der Tagesaktivitäten, was den zentralen Teil der Modellverarbeitung darstellt. Den einzelnen Klassen sowie der Kopp-  
lung von Aktivitäten mit Energiebedarfen sind nachfolgend eigene Unterkapitel gewidmet.

Zur Vorbereitung von Simulationsdurchläufen wurden bisher die Haushaltsverteilung und die Verteilung der POIs sowie der Arbeitsstätten festgelegt (Verteilung der Koordinaten im Raum). Weiterhin wurden den Agenten Eigenschaften und den Haushalten Technologien zugeordnet. Abbildung 5.7 zeigt mit den schraffiert dargestellten Feldern die bisher abgearbeiteten Schritte der Simulation.





Die nächsten Schritte innerhalb der Simulation umfassen die Wahl der Aktivitäten der Agenten. In der Simulation werden für den Haushaltssektor Tätigkeiten im Haus oder in der Wohnung und außerhäusliche Aktivitäten unterschieden. Nach der Aktivitätenwahl, folgt bei Außer-Haus-Aktivitäten das Festlegen des Ortes und die Wahl eines Verkehrsmittels. Darüber hinaus wird die Dauer der einzelnen Aktivitäten bestimmt. Als letzter Schritt erfolgt die Zuordnung von Energiebedarfen zu dem durch die Simulation bestimmten Aktivitätenprogramm. Die in Abbildung 5.7 dargestellte sequentielle Abarbeitung der einzelnen Schritte spiegelt reale Entscheidungsprozesse allerdings nicht immer adäquat wieder. So fanden Hannes et al. durch eine qualitative Datenerhebung heraus, dass bei der Aktivitätenplanung insbesondere hinsichtlich Ziel- und Verkehrsmittelwahl keine sequenzielle Abfolge zu bestehen scheint (vgl. [70], Hannes u. a.).

Es gibt, da die Dauer der Aktivität, der Ort der Aktivität, das Verkehrsmittel und die Aktivität selbst bestimmt werden, prinzipiell 4 Fakultät, also 24 Möglichkeiten der Anordnungen dieser Entscheidungen. Drei dieser denkbaren Sequenzen werden nachfolgend aufgeführt:

- Ort —> Verkehrsmittel —> Dauer —> Aktivität
- Ort —> Aktivität —> Dauer —> Verkehrsmittel
- Verkehrsmittel —> Ort —> Aktivität —> Dauer
- ...

Die verschiedenen Anordnungen der Entscheidungsabfolgen lassen sich großteils plausibel begründen. So ist es z.B. denkbar, dass man gerne einen ganz bestimmten Ort besuchen möchte und erst danach entscheidet, wie man dort hin gelangt und welche Aktivitäten man an dem Zielort ausführen wird. Dennoch wurde für die Modellierung lediglich das in Abbildung 5.7 beschriebene sequentielle Vorgehen gewählt. Dabei steht insbesondere die Abfolge Aktivitätenfestlegung und anschließende Wahl des Ortes der Aktivität, in Einklang mit anderen Simulationsmodellen wie dem Travel Activity Scheduler for Household Agents (TASHA) (vgl. [137], Roorda u. Habib). Zukünftig sind in diesem Bereich allerdings weitere Modell Anpassungen denkbar.

#### **5.4.8.1 Aktivitätenfestlegung**

Zur Realisierung des Schrittes Aktivitätenfestlegung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Ein Ansatz zur Erzeugung von künstlichen Tagesaktivitäten bietet die



Nutzung genetischer Algorithmen (vgl. [37], Charypar u. Nagel). Dabei ist es jedoch notwendig, Nutzenfunktionen zu unterstellen, um Fitnesswerte für ermittelte Tagesabläufe zu bestimmen. Die Fitnessfunktion dient bei genetischen Algorithmen der Bewertung der Güte einer Lösung. Nutzenfunktionen werden bei der hier vorgestellten Implementierung jedoch nicht explizit unterstellt.

Abbildung 5.8 veranschaulicht, wie die Simulation, und hier speziell die Abfolge von Tätigkeiten im Verlauf des zu simulierenden Tages, für diese Arbeit prinzipiell umgesetzt wurde.

**Abbildung 5.8:** Generierung der Tagestätigkeiten

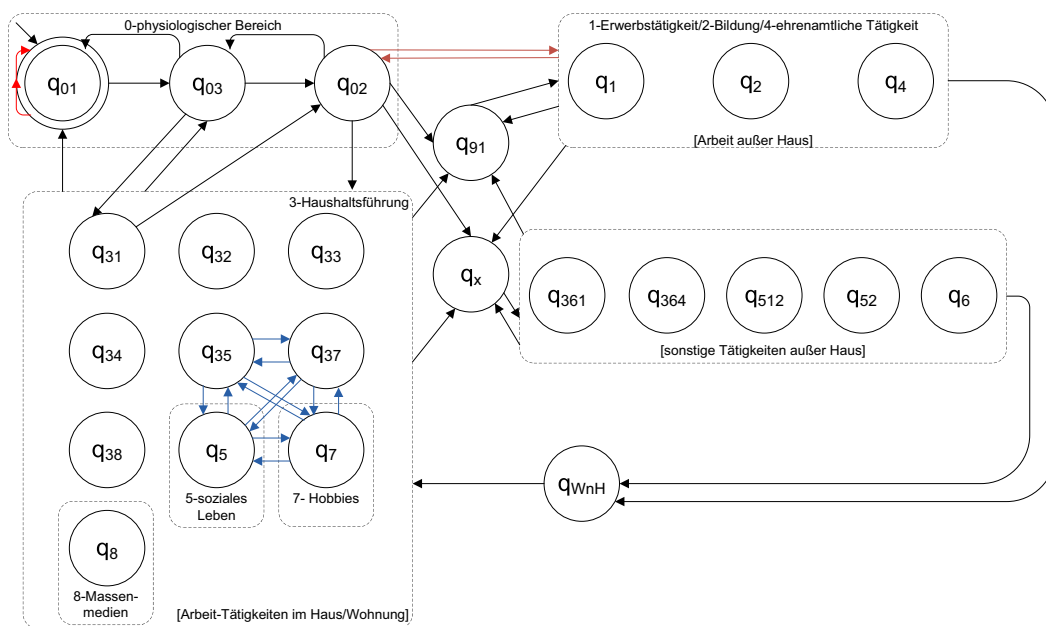


Abbildung 5.8 orientiert sich dabei an der graphischen Darstellung von Automaten, wie sie in der Automatentheorie verwendet wird. Zustände werden durch Kreise symbolisiert, Pfeile stehen für Zustandsübergänge und doppelte Kreise deklarieren Endzustände. Da die Abbildung die Vorgehensweise verdeutlichen soll, sind nicht alle Zustände als auch Zustandsübergänge, die im Programm relevant sind, graphisch abgebildet. Auch können die Agenten in ihrem Zustand verbleiben. Dies ist in der Grafik nur für den Zustand  $q_{01}$  mittels des roten Pfeils verdeutlicht - gilt aber für alle Zustände. Die blauen Pfeile in

der Grafik deuten an, dass vielfältige Aktivitätsübergänge möglich sind<sup>102</sup>.

Die implementierten Zustände orientieren sich an der Liste der Aktivitäten und Aktivitätsbereiche der Zeitbudgeterhebung von 2001/2002. Die Zustandsbeschreibung zu Abbildung 5.8 ist in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Länge und Bezeichnung der Indices entspricht der Klassifizierungsebene, die bei der Kodierung der Zeitbudgeterhebung verwendet wurde. Die Zeitbudgetkategorien selbst wurden nur stark vereinfacht in die Simulation einbezogen. So ist z.B. der Bereich Bildung ( $q_2$ ) in der Simulation nur ein Zustand. Im Gegensatz dazu unterscheidet die Zeitbudgetstudie für den Bereich Bildung/Qualifikation in der feinsten Untergliederung 37 Kategorien. Um die Tagesplanung der Menschen besser zu verstehen, wäre eine umfassendere Abbildung der Zeitbudgetkategorien in einem Simulationsmodell anstrebenswert. Da viele Tätigkeiten allerdings nur bedingt mit Energieverbräuchen gekoppelt werden können, wurden für diese Modellierung nur 15 Zustände betrachtet (vgl. Abb. 5.11)<sup>103</sup>.

**Tabelle 5.2:** Zustandsbeschreibung - Tagestätigkeiten

Zustand	Beschreibung
$q_{01}$	Schlafen
$q_{03}$	Persönlicher Bereich (z.B. anziehen)
$q_{02}$	Essen / Trinken
$q_1$	Erwerbstätigkeit
$q_2$	Qualifikation / Bildung
$q_4$	Ehrenamtliche Tätigkeit / Freiwilligenarbeit / Informelle Hilfe
$q_{91}$	Wegezeiten für Weg zur Arbeit / Bildung ( $q_1, q_2, q_4$ )
$q_x$	Wegezeiten für sonstige außer Haus Tätigkeiten ( $q_{361}, q_{364}, q_{512}, q_{52}, q_6$ )
$q_{361}$	Einkaufen
$q_{364}$	Medizinische Dienstleistungen
$q_{512}$	Freunde besuchen
$q_{52}$	Unterhaltung und Kultur
$q_6$	Teilnahme an sportlichen Aktivitäten bzw. Aktivitäten in der Natur
$q_{WnH}$	Wegezeit für Weg nach Hause
$q_{3x}$	Haushaltstätigkeiten (genauso wie $q_5, q_7, q_8$ )

Die Zustandsübergänge in diesem Simulationsmodell basieren auf Übergangswahrschein-

<sup>102</sup>Auf eine vollständige Abbildung aller Tätigkeitsübergänge ist auf Grund der übersichtlicheren Darstellung verzichtet worden.

<sup>103</sup>Die in der implementierten Simulation berücksichtigten Zustände weichen daher geringfügig von der Zustandsautomatenabbildung 5.8 bzw. der Tabelle 5.2 ab. So wurden z.B. medizinische Dienstleistungen derzeit nicht berücksichtigt.

lichkeiten<sup>104</sup>. Zustände und deren Übergänge durch Übergangswahrscheinlichkeiten können mit Hilfe von Markovketten bzw. Markovprozessen<sup>105</sup> beschrieben werden. Widén et. al aus der *Built Environment Energy Systems Group* der Universität Uppsala (vgl. z.B. [176], Widén u. Wäckelgård bzw. [174], Widén u. a.) nutzen nichthomogene Markovketten um Tagesaktivitäten zu simulieren. Sie verfolgen ebenfalls das Ziel, Tagesabläufe basierend auf Zeitbudgetdaten für die Bestimmung von Energienachfragen nutzbar zu machen. Bei Widén et. al dienen Zeitbudgetdaten der Bestimmung der Einträge der Transitionsmatrix. Die generierten Tagesabläufe werden anschließend zur Abschätzung der Haushaltselektrizitätsnachfragen herangezogen.

Wie Widén aufzeigt, sind Markovketten ein nutzbares Werkzeug zur Abschätzung realistischer Stromnachfragen der Haushalte. In dem in dieser Arbeit erstellten Modell werden "reine" Markovketten aufgrund der folgenden Kritikpunkte nicht verwendet. Bei Markovketten handelt es sich im Normalfall um einen gedächtnislosen Prozess (Markovketten erster Ordnung). In der Realität sind den Menschen jedoch vorangegangene Tätigkeiten bewusst. Die bisher an einem Tag durchgeführten Aktivitäten beeinflussen dabei zukünftig anstehende Entscheidungen. Auch müssten zu einem späteren Zeitpunkt geplante Tätigkeiten bei der Aktivitätenwahl in einem Zeitschritt berücksichtigt werden. Ein weiterer prinzipieller Kritikpunkt betrifft den Informationsverlust durch das Vernachlässigen von Eigenschaften der Agenten. In Zeitbudgetstudien werden unzählige Daten (z.B. Alter, Geschlecht, Bildungsgrad, Einkommen, usw.) erfasst. Diese Eigenschaften spielen bei den Tätigkeitsübergangswahrscheinlichkeiten in der Arbeit von Widén et al. keine Rolle. Die simulierten Haushalte bzw. Bewohner sind sozusagen eigenschaftslos. Da soziodemografische Merkmale der Personen in den Zeitbudgetstudien mit erfasst wurden, könnten sie prinzipiell in Untersuchungen einbezogen werden. Dies wäre z.B. von Bedeutung, um zu untersuchen, wie jüngere oder ältere Menschen ihre Zeit verbringen. Auf der Basis solcher Untersuchungen lassen sich dann Energiebedarfe für Städte und Gemeinden mit unterschiedlicher demographischer Struktur abschätzen. Analysen in Abhängigkeit bestimmter Merkmale sind im Allgemeinen mit dem Ansatz von Widén et. al. nicht möglich. Auch wird in diesem Ansatz der geographische Raum nicht betrachtet. Die Raumausstattung beeinflusst jedoch die Ausgestaltung von Tagesabläufen. Da für konkrete Orte in der Regel keine Zeitbudgetdaten zur Verfügung stehen, sollten realistische Tagesabläufe auch auf Basis von Merkmalen wie der Raum- und Haushaltsausstattung

---

<sup>104</sup>Es handelt es sich daher nicht um einen nichtdeterministischen Automaten. Nichtdeterministische Automaten beschreiben lediglich Möglichkeiten von Zustandsänderungen.

<sup>105</sup>Markovprozesse besitzen im Gegensatz zu Markovketten einen stetigen Zustandsraum.

sowie weiteren soziodemographischen Merkmalen der Stadtbevölkerung, generiert werden. Dadurch wäre auch bei fehlenden Zeitbudgetdaten eine Übertragung auf andere Ortschaften möglich. Insgesamt ist der Ansatz von Widén et al. unter den genannten Einschränkungen sehr gut für die Untersuchung von Ist-Zuständen geeignet, erlaubt aber kaum Ausblicke in die Zukunft.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulation nutzt die Idee der Markovkette, erweitert diesen Ansatz jedoch durch die Einbeziehung von Regeln. Insofern kann von einem hybriden Modell gesprochen werden. In der Literatur wird, wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, in diesem Zusammenhang von *rule based models* bzw. *computational process models* gesprochen. Die Alternative zu regelbasierten Modellen sind nutzenmaximierende Modelle (utility maximisation models). Das in diesem Modell Regeln verwendet werden und nicht der nutzenmaximierende Ansatz verfolgt wird, ist auf Argumente von Gärling et al. zurückzuführen. Gärling et al. betonen, dass regelbasierte Ansätze Prozesse der Entscheidungsfindung besser abbilden können. Für reine Verkehrsnachfrageprognosen können nutzenmaximierende Modelle verwendet werden. Für ein besseres Verständnis von Verhalten werden jedoch andere Ansatz gebraucht. Eine Möglichkeit bieten hier regelbasierte Modelle (vgl. [67], Gärling u. a.).

Zusätzlich zur Einbeziehung von Regeln wird der Raum explizit als wesentliche Komponente in diese Simulation eingebunden. Als Erweiterung zur Anwendung reiner Markovketten bei Widén et al. werden auch die Eigenschaften von Agenten und Haushalten berücksichtigt. Diese Ergänzungen sollen es ermöglichen, die Entscheidungsprozesse transparenter zu gestalten und die Simulation auf eine breitere Anwendungsbasis zu stellen.

Die Simulation startet um 24Uhr und durchläuft im 10 Minuten Takt den Tag. Der Zustand  $q_{01}$  dient als Startzustand und entspricht dem Zustand *schlafen*. Hier zeigt sich eine weitere Einschränkung des Modells, da natürlich auch zu diesem Zeitpunkt in der Realität verschiedene Tätigkeiten stattfinden können. Nach der Auswertung aller Tagesdatensätze der Zeitbudgetstudie hielten sich die Befragten um Mitternacht in 88,5% der Fälle zu Hause auf. Zu diesem Zeitpunkt wird in 82,7% der Fälle geschlafen. Die zweithäufigste Tätigkeit zu diesem Zeitpunkt ist mit ca. 3,6% der Fälle fernsehen. Weitere Tätigkeiten, die zu diesem Zeitpunkt ausgeführt wurden, besitzen eine Wahrscheinlichkeit von weniger als zwei Prozent. Um das Modell einfach zu halten, gibt es jedoch in dieser Implementierung nur den einen Startzustand *Schlafen*.

Neben diesem Zustand ist der Zustand *Essen/Trinken* hervorzuheben. Es handelt sich

hierbei, wie beim Schlaf, um ein Grundbedürfnis im Sinne der Maslowschen Bedürfniseinteilung (vgl. [44], Drumm). Im erstellten Modell wird davon ausgegangen, dass der Mensch mehrmals am Tag Mahlzeiten zu sich nimmt. Die Agenten sollten demnach mehrmals in den Zustand *Essen/Trinken* gelangen. Der Zustand soll dabei die klassischen drei Hauptmahlzeiten abbilden. Würde man lediglich klassische Markovketten für die Simulation verwenden, wäre die Abbildung der Mahlzeiten vermutlich nur schwer umsetzbar.

Zur programmiertechnischen Umsetzung der Aktivitätenübergänge wurden *Dictionaries* herangezogen. Dictionaries stellen eine Auflistung von Schlüsseln und Werten dar. Die Schlüssel werden in der Form *derzeitigeTätigkeit\_neueTätigkeit* gespeichert. Die Werte des Dictionaries entsprechen den Übergangswahrscheinlichkeiten. Bei der Wahl einer neuen Tätigkeit wird zuerst ein neues *Dictionary* gebildet, das nur die Übergänge von der aktuell ausgeführten Tätigkeit enthält, also eine Teilmenge des ursprünglichen Wörterbuches. Da die Wahrscheinlichkeiten für Aktivitätenübergänge von Randbedingungen abhängen, muss es möglich sein, die Übergangswahrscheinlichkeiten zu manipulieren. Hierzu werden Situationen festgelegt, also Regeln eingebunden. Im Folgenden sei ein Beispiel genannt: Ein Agent ist in einem Alter, in dem nicht mehr gearbeitet wird (Situation: Rentner). In diesem Fall wird die Übergangswahrscheinlichkeit zur Tätigkeit *Arbeiten* auf Null gesetzt. Dieser Wörterbucheintrag kann dann in der Programmierung aus dem neuen Wörterbuch gelöscht werden. Weiterhin muss gesichert sein, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten genau Eins ergibt. Im erwähnten Beispiel muss also darauf geachtet werden, dass der ursprüngliche Wert der Übergangswahrscheinlichkeit hin zum Zustand *Arbeiten* auf die anderen Zustandsübergänge verteilt wird. Hierzu wurde eine eigene Prozedur implementiert. Die Aufteilung wurde in vereinfachter Form realisiert, so dass eine gleichmäßige Verteilung stattfindet. Für die Beschreibung realer Vorgänge ist diese Verteilungsform sicher unzureichend. Sie könnte in einer zukünftigen Implementierung viel ausdifferenzierter erfolgen. Ein weiteres Beispiel ist die Situation schlechtes Wetter: Hier könnten die Wahrscheinlichkeiten für innerhäusliche Aktivitäten zu Lasten von außerhäuslichen Tätigkeiten um einen bestimmten Betrag erhöht werden<sup>106</sup>. Weiterhin muss bei der Implementierung der Manipulation von Wahrscheinlichkeiten darauf geachtet werden, dass die Einzelwahrscheinlichkeiten der axiomatischen Definition der Wahrscheinlichkeit nach Kolmogorow genügen (d.h.  $0 \leq P(A) \leq 1$ ). Da sich Situationen, in denen sich die Agenten befinden, überschneiden können, muss darauf in der programmiertechnischen Umsetzung reagiert werden. Die Regeln, die Situationen beschreiben,

---

<sup>106</sup>Dies betrifft hauptsächlich Aktivitäten die tatsächlich im Freien stattfinden.

können dabei als *Entscheidungsbaum* realisiert werden. Es muss jedoch bedacht werden, dass die Anzahl der Blätter (Situationen) mit der Tiefe bei nicht entarteten Bäumen exponentiell steigt.

Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Simulation das Ende des Tages, also den 24-Stundenzeitraum, einhält. Da wie bereits erwähnt, aus den Zeitbudgetdaten ersichtlich ist, dass die überwiegende Anzahl der Menschen um Mitternacht schläft, wurde der Zustand *Schlafen* auch als einzig möglicher Endzustand gewählt. Um zu gewährleisten, dass *Schlafen* der letzte Zustand der Agenten ist, wird bereits vor der eigentlichen Aktivitätensimulation das Ende des Tages festgelegt. Das heißt, es wird in Abhängigkeit von der Eigenschaft Alter eine Zeit am Abend bestimmt, ab der die Agenten endgültig zu Hause sind und in den Zustand *Schlafen* übergehen. Da das Ende des Tages für jeden Agenten bereits zu Beginn festgelegt ist, muss abgesichert sein, dass die letzte frei zu entscheidende Tätigkeit zeitlich mit dem Ende des Tages übereinstimmt. Es kann daher notwendig werden, Aktivitäten am Ende des Tages anzupassen. Das ist in dieser Arbeit der einzige Fall, in dem eine Art *rescheduling* stattfindet.

Das Neuordnen von Tagesabläufen (*rescheduling*) ist insgesamt von Bedeutung für Modellierungen (vgl. [38], Chen u. a., [86], Joh u. a.). In der Realität wird ein *rescheduling* unter anderem durchgeführt, wenn auf Grund unvorhergesehener Ereignisse ein Zeitgewinn bzw. ein Zeitverlust eintritt. Das Standardbeispiel in der Literatur sind unerwartet verlängerte Wegezeiten, verursacht z.B. durch Staus (vgl. z.B. [86], Joh u. a.). Im Allgemeinen kann auf solch ein unerwartetes Ereignis folgendermaßen reagiert werden:

- Wegfall einer späteren Aktivität
- Verschieben einer späteren Aktivität
- Verkürzen einer späteren Aktivität
- Änderung der geplanten Aktivitäten
- Änderung des Ortes der Aktivitäten
- Übertragung von Aktivitäten auf andere Personen

Olaru und Smith stellen fest, dass die Mehrzahl der Tagesabläufe durch eine Verzögerung der Folgetätigkeit und eine Veränderung der Aktivitätsdauer angepasst wird (vgl. [121], Olaru u. Smith). Für die Untersuchung der Reaktion auf unerwartete Ereignisse und deren daraus folgende Anpassungen nutzen Olaru und Smith die Möglichkeiten



der Fuzzylogik (vgl. [121], Olaru u. Smith). Die Wahl der Anpassungsstrategie ist von der Dauer des Zeitgewinns bzw. des Zeitverlustes als auch von der Flexibilität der betrachteten Aktivitäten abhängig (vgl. [121], Olaru u. Smith). So ist z.B. ein Ausflug vollkommen flexibel, so dass verschieden auf vorangegangene Verzögerungen reagiert werden kann. Die Tätigkeit Arbeit kann, z.B. aufgrund unvorhergesehener Ereignisse, in Abhängigkeit des Arbeitsvertrages nach hinten verschoben werden, so dass ein späterer Arbeitsbeginn durch längere Arbeitszeiten ausgeglichen werden kann (flexible Arbeitszeiten vorausgesetzt). Dagegen können Veranstaltungen, wie Konzerte, durch vorgegebene Start- und Endzeiten völlig unflexibel sein, so dass diese Aktivitäten bei Zeitverzug in der Regel ausfallen.

#### 5.4.8.2 Ort der Aktivität

Nachdem eine neue Tätigkeit gewählt wurde, wird der Ort der festgelegten Tätigkeit bestimmt. Dieser ist natürlich nur bei außerhäuslichen Aktivitäten von Bedeutung. Für die Festlegung des Ortes ist als erstes die Tätigkeit selbst von Interesse. So ist für die Tätigkeit *Arbeiten* der Ort der Tätigkeit durch die Koordinaten der zugeordneten Arbeitsstätte direkt vorgegeben. Für die Tätigkeit *Freunde besuchen* wurde den Agenten zu Beginn der Simulation eine Liste anderer Agenten zugeordnet. Die Zuordnung erfolgte unter Berücksichtigung der Agenteneigenschaft Alter, dann jedoch völlig zufällig. Das heißt, bei der Tätigkeit *Freunde besuchen* wird ein Agent aus der Bekanntenliste zufällig gewählt. Der Zielort ist dann durch die Haushaltskoordinaten dieses Agenten gegeben. Für Tätigkeiten wie *Einkaufen* dienen die aus dem GIS übergebenen POIs als Zielorte. Aus diesen muss ein Ort ausgewählt werden. Hierzu gibt es die Möglichkeit Entfernungen zwischen dem aktuellen Standort und den POIs zu bestimmen. Um Wahrscheinlichkeiten für das Besuchen bestimmter Orte festzulegen, kann die Idee des Gravitationsansatzes (vgl. *gravitation models*) genutzt werden. Hierunter ist zu verstehen, dass Orte die weiter voneinander entfernt sind weniger miteinander in Verbindung stehen, da die Überbrückung von größeren Distanzen mit vermehrten Kosten bzw. vermehrten Zeitverbrauch einhergeht. Somit werden im Modell vor allem Orte gewählt, die bevorzugt in der Nähe des Arbeitsplatzes bzw. Wohnortes der Agenten liegen.

Die Ortswahl ist darüber hinaus von dem vorhandenem Wissensstand beeinflusst, der durch Erfahrungen geprägt ist (vgl. *Mental Maps*). Hierbei muss die Umwelt mit ihrem soziokulturellen Charakter betrachtet werden (vgl. [65], Golledge u. Gärling). Orte in der Nähe des Wohnortes sind in der Regel bekannter bzw. vertrauter, was es plausibel

macht, dass diese Orte eher aufgesucht werden. Nach Hannes et al. sind Ziele in den meisten Fällen allerdings durch Standardentscheidungen vorbelegt, was durch gewohnheitsmäßiges Handeln begründet ist (vgl. [69], Hannes u. a.).

In der Realität verfügen Menschen nicht über vollständige Informationen. In der Programmierung können unvollständige Informationen, z.B. dadurch umgesetzt werden, dass bestimmte POIs dem Agenten gar nicht bekannt sind und somit nicht zur Auswahl stehen. Zukünftig sollten in diesem Zusammenhang Global Positioning System (GPS) Daten genutzt werden. So geben Liao, Fox und Kautz einen Einblick, wie Orte und Aktivitäten aus GPS-Trajektorien gewonnen werden können (vgl. [105], Liao u. a.).

#### 5.4.8.3 Verkehrsmittelwahl

Die Verkehrsmittelwahl ist in diesem Simulationsmodell derzeit sehr vereinfacht implementiert und wird vordergründig durch die Entfernung zum Zielort beeinflusst. Die Wahrnehmung des Raumes geschieht in erster Linie über Distanzen. Die Beurteilung der Erreichbarkeit von Orten mittels verschiedener Verkehrsmittel ist ein weiterer Aspekt der Wahrnehmung. Weiterhin sind Wahrnehmungen auch mit den Gewohnheiten der Menschen verknüpft. So nehmen Autofahrer Gegebenheiten wie Staus oder Parkmöglichkeiten intensiver wahr als andere Verkehrsteilnehmer (vgl. [70], Hannes u. a.).

Die Entfernung vom derzeitigen Standort der Agenten zum Zielort wird im Modell durch die euklidische Distanz berechnet. Zu dieser Distanz wird noch ein Zufallswert addiert, da die euklidische Distanz als Luftlinie eine nicht realistische Untergrenze der Wegstrecke zwischen zwei Orten darstellt. Um die Entfernung bestimmen zu können, wird die aktuelle Position des Agenten als Agenteneigenschaft mitgeführt. Die Positionen der potentiellen Zielorte sind durch die Koordinaten der POIs aus dem GIS bekannt. Eine genauere Abschätzung von Distanzen kann implementiert werden, wenn reale Siedlungen mit den zu Grunde liegenden Straßendaten betrachtet werden (vgl. Kapitel 5.4.9).

Einen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl hat darüber hinaus die Autoverfügbarkeit sowie das Alter der Agenten. Für die Nutzung eines PKWs ist im Modell ein Mindestalter erforderlich. Eine Eigenschaft wie Führerscheinbesitz wird jedoch nicht berücksichtigt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass kurze Distanzen zumeist zu Fuß oder per Fahrrad zurückgelegt werden. Längere Distanzen werden, wenn ein Auto verfügbar ist, in der Regel mit dem PKW überbrückt. In wenigen Fällen, z.B. bei Nichtverfügbarkeit eines Autos oder bei Nichterfüllung des Mindestalterkriteriums, wird auf den ÖPNV



zurückgegriffen. Die Unterscheidung der Agenten hinsichtlich des Mobilitätstyps wird derzeit, wie folgt, berücksichtigt. So nutzen *unreflektierte PKW Nutzer* das Auto bei Autoverfügbarkeit immer, unabhängig von der zurückzulegenden Distanz<sup>107</sup>. Der Autoverweigerer wird selbst längere Distanzen mit dem Fahrrad zurücklegen oder auf den ÖPNV zurückgreifen. Die anderen Mobilitätstypen machen ihre Entscheidung, von der zu überbrückenden Distanz und der Witterung abhängig.

Der häufigste in der Literatur verwendete Ansatz zur Bestimmung der Verkehrsmittelwahl basiert auf dem Nutzenkonzept. Es wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsträgerwahl lediglich Mittel zum Zweck ist. Das gewählte Verkehrsmittel soll den Nutzer zum Zielort seiner Aktivität befördern. Der Nutzer, so die Unterstellung, versucht den negativen Nutzen, der durch Fahrtkosten bzw. Zeitverlust gegeben ist, zu minimieren (vgl. [33], Buehler). Buehler untersuchte in seinem Artikel die Determinanten der Verkehrsmittelwahl anhand der Beispielländer Deutschland und USA. Signifikante Einflüsse auf die Verkehrsmittelwahl stellten Tätigkeitsziele (z.B. Einkaufen), der Landnutzungsmix (im Fall von Deutschland), die Haushaltskonstellation in Kombination mit der Berufstätigkeit, das Haushaltseinkommen und das Alter dar.

Abschließend soll beispielhaft die unterschiedliche Nutzung von Verkehrsträgern in Europa aufgezeigt werden. So fuhren die Dänen nach Angaben der European Environmental Agency im Jahr 2000 im Schnitt 936 km Fahrrad, wohingegen in Spanien der pro Kopf zurückgelegte Weg mit dem Fahrrad lediglich 20 km betrug (vgl. [53], European Environmental Agency). Solche Unterschiede sind nicht durch einen Indikator begründbar. Häufig müssen weiche Faktoren, die schlecht in Zahlen auszudrücken sind, beachtet werden. Das Beispiel soll verdeutlichen, dass in diesem Zusammenhang keine allgemeingültigen Festlegungen für die Modellierung getroffen werden können. Regionale Unterschiede müssen berücksichtigt werden.

#### 5.4.8.4 Dauer der Aktivität

Nach der Bestimmung einer Tätigkeit, der Festlegung des Ortes und der Verkehrsmittelwahl wird als nächster Schritt die Dauer der neu gewählten Tätigkeit festgesetzt. Der Zeitdauerbereich wurde hierbei für jede mögliche Tätigkeit fest vorgegeben. Wichtig

---

<sup>107</sup>Unreflektierte PKW Nutzer sind ein von Kramer (vgl. [98], Kramer) identifizierter Mobilitätstyp (vgl. Kapitel 5.4.7.1).

ist in diesem Zusammenhang die Verteilung der Tätigkeitsdauer innerhalb des Zeitdauerbereiches. Um einfach zu starten, wurden die Tätigkeitsdauern als gleichverteilte Zufallswerte aus dem Zeitdauerbereich bestimmt (hierzu wurde die implementierte Random-Klasse benutzt, die pseudo-zufällige Zufallswerte liefert<sup>108</sup>). Auf gleichverteilten Zufallsvariablen basierend können Zufallsvariablen anderer Verteilungen bestimmt werden. Simpson-verteilte (Dreiecksverteilung), exponentialverteilte als auch normalverteilte Zufallsvariablen können mit weiteren implementierten Methoden generiert werden. Hierzu wurde die jeweilige inverse Verteilungsfunktion bzw. im Fall der normalverteilten Zufallswerte die Polar-Methode verwendet.

Somit können prinzipiell Zeitdauern von Tätigkeiten mit Hilfe verschiedener Methoden und Parameter festgelegt werden (erinnert sei an dieser Stelle an die Verteilung der Dauer von Telefongesprächen, die durch eine Exponentialverteilung beschrieben wird). Die Berechnung der Dauer der Tätigkeit hat zum einen den Vorteil, dass nicht jeder Agent in jedem diskreten Zeitschritt eine neue Entscheidung treffen muss, was zur Verminderung von Rechenaufwand führt, sondern vereinfacht auch die Generierung realistischer Tagesabläufe. Des Weiteren kann als Argument für diese Vorgehensweise auch angeführt werden, dass in der Realität Entscheidungen auch nicht in einem festen Takt getroffen werden.

Der Beginn der Tagessimulation ist mit der Tätigkeit *Schlafen* für den Zeitschritt 0:00-0:10 festgelegt. Die erste Aufgabe für die Simulation besteht demnach darin die Aufstehzeitpunkte (Dauer des Zustandes *Schlafen*) der Agenten zu bestimmen. Während des Tages wird die Dauer der gewählten Tätigkeiten ebenfalls mit Hilfe der oben beschriebenen Vorgehensweise generiert. Das Ende der Tagessimulation ist wiederum durch die Tätigkeit *Schlafen* festgelegt. Ab einem gewissen Zeitpunkt ist *Schlafen* also wie ein absorbierender Zustand in einer Markovkette.

Das Ergebnis der Simulation sind künstlich generierte Tagesabläufe für die Bewohner einer fiktiven Stadt. Die generierten Aktivitäten werden im letzten Schritt mit plausiblen Energieverbräuchen gekoppelt, was im folgenden Kapitel eingehender beschrieben wird.

---

<sup>108</sup>Siehe C# Dokumentation - die Zufallswerte basieren auf dem von D.E. Knuth entwickelten Algorithmus eines subtraktiven Zufallsgenerators.

### 5.4.9 Kopplung von Aktivitäten mit Energieverbräuchen

Bei der Bestimmung des Energieverbrauchs kann direkter von indirektem Energieverbrauch unterschieden werden. Indirekte Energie, ist die Energie, die bereitgestellt werden muss, um Produkte und Dienstleistungen für Haushalte zur Verfügung zu stellen. Der indirekte Anteil des Energieverbrauchs eines Haushaltes kann dabei relativ hoch sein (vgl. dazu Kapitel 5.4.4). Biesot und Norman betonen, dass die Wahl der Güter als auch die Haushaltsführung an sich einen beachtlichen Einfluss auf die Umwelt haben (vgl. [19], Biesiot u. Noorman). Hinsichtlich der Haushaltsmetabolismen führen die Autoren verschiedene Treiber des Energieverbrauchs<sup>109</sup> und den Treibern entgegenwirkende Prozesse auf (vgl. [19], Biesiot u. Noorman). Nach den Untersuchungen sind die Treiber bedeutender als ihnen entgegenstrebende Faktoren.

In der vorliegenden Arbeit wurden nur direkte Energieverbräuche berücksichtigt. Die bereitzustellende Leistung für Beleuchtung wurde mit einer Konstanten integriert, die Tanimoto et al. entnommen wurde. Tanimoto et al. legten  $5W/m^2$  als Wert für den Energieverbrauch von Beleuchtung fest (vgl. [158], Tanimoto u. a.). Energie für Beleuchtung wird benötigt, wenn mindestens eine Person im Haushalt anwesend ist. Dabei ist die Tageszeit zu beachten. Für die vorliegende Modellierung wird davon ausgegangen, dass Beleuchtung nur zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang notwendig ist (vgl. Kapitel 5.4.7.3). Im Vergleich dazu gaben Tanimoto et al. die Beleuchtungszeiten für die vier Jahreszeiten direkt vor. Die mögliche Verwendung von Markovketten zur Abschätzung des häuslichen Energiebedarfs für Beleuchtung ist bei Widén (vgl. [175], Widén u. a.) beschrieben. Um die Leistungen diverser Haushaltsgeräte (z.B. PC, TV, ...) für den laufenden als auch für den standby Betrieb in die Simulation zu integrieren, wurden durchschnittliche Leistungswerte verwendet. Diese wurden ebenfalls aus der Veröffentlichung von Tanimoto et al. entnommen (vgl. [158], Tanimoto u. a.).

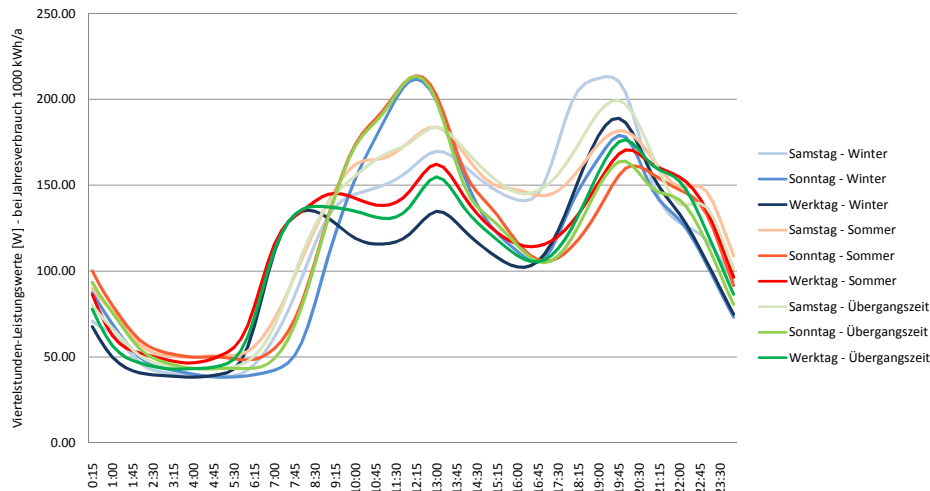
In Abbildung 5.9 sind synthetische standardisierte Lastprofile für Haushalte ( $H0$ ) dargestellt, wie sie im Auftrag des VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft)<sup>110</sup> durch die Brandenburgische Technische Universität Cottbus erstellt wurden. Die erstellten Profile werden dabei für Abrechnungen genutzt. Aufgenommen werden Kunden, die eine festgelegte Jahresstromnachfrage, als auch eine festgelegte Netzanschlussleistung nicht überschreiten.

---

<sup>109</sup>Treiber des Energieverbrauchs sind z.B. die Haushaltsgröße. Ein entgegenwirkender Einfluss sind unter anderem der technologische Fortschritt.

<sup>110</sup>Im Jahr 2007 ging der VDEW im BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) auf.

**Abbildung 5.9:** Standardlastprofile - Haushalt



Bärwaldt und Kurrat weisen allerdings darauf hin, dass der Lastgang einzelner Haushalte erheblich von den standardisierten Lastprofilen abweichen kann (vgl. [32], Bärwaldt u. Kurrat). Die Summe vieler einzelner Haushaltslastgänge sollte jedoch mit den Standardlastprofilen vergleichbar sein. Eine akzeptable Simulation von Stromnachfragen sollte demnach die Verbrauchsspitzen in der Abend- und Mittagszeit wiedergeben.

Bei Außer-Haus-Tätigkeiten wird nur ein geschätzter Energieverbrauch berücksichtigt, der für den Transport zum Zielort notwendig ist. Der Tätigkeit selbst (z.B. einem Restaurantbesuch) wird kein Energiebedarf zugeordnet. Die benötigte Energie für den Transport ist in der derzeitigen Implementierung nur abhängig von der Entfernung (euklidische Distanz) und dem Verkehrsmittel. Dabei werden die Verkehrsmittel mit einem durchschnittlichen Energieverbrauch versehen. Somit kann die in Kapitel 5.4.8.3 genannte vordergründige Raumwahrnehmung in der Modellierung durch die Verwendung von Distanzmaßen akzeptabel abgebildet werden.

Bei der Zuordnung des Energieverbrauchs für den Transport in konkreten Siedlungen wäre es allerdings angemessener, eine reale Distanz zwischen Orten zugrunde zu legen. So könnte die kürzeste Distanz, wie sie durch Navigationssysteme berechnet wird, verwendet werden. Für die Simulation wurde in diesem Zusammenhang eine Methode implementiert, die die Google Directions API nutzt, um Gesamtdistanzen zu bestimmen. Die API darf derzeit jedoch nur in Verbindung mit Google Karten genutzt werden, so dass die

Methode ungenutzt bleibt. Wenn Straßendaten als Vektordaten zur Verfügung stehen, so ermöglicht es der Dijkstra- bzw. der  $A^*$ -Algorithmus die kürzesten Wege zwischen zwei Knoten zu finden. Distanzmatrizen könnten so der Mikrosimulation zur Verfügung gestellt werden.

#### 5.4.10 Modellausgabe - GIS-Schnittstelle

Die Modellausgabe kann unter den folgenden zwei Hauptpunkten zusammengefasst werden.

- Ausgabe der Aufenthaltsorte der Agenten zu jedem Zeitschritt
- Elektrizitätsbedarf für jede Stadtzelle in jedem Zeitschritt

Eine echte Rückkopplung im Sinne von einem Wechselspiel zwischen dem verwendeten GIS und der Mikrosimulation ist für diese Arbeit nicht zielführend und wurde somit nicht umgesetzt. Die Rückkopplung besteht nur in dem Sinn, dass Ergebnisse der Mikrosimulation in für das verwendete GIS lesbare Datenformate exportiert werden können.

Aufenthaltsorte (Koordinaten) der Agenten im Tagesverlauf werden in der Simulation gespeichert, so dass diese Daten als ESRI Shape Datei abgespeichert werden können. Neben den Koordinaten wird für diesen Export die Agenten- und die ihm zugehörige Haushaltsidentifikationsnummer in die Sachdatentabelle (dbf Datei) geschrieben. Weitere Sachdaten (z.B. Tätigkeit) könnten in Sachdatentabellen exportiert werden. Die Agenten- und Haushaltsnummern können dazu dienen, Verknüpfungen zu weiteren Daten herzustellen (joining tables). Der Export als Shape-Datei dient in dieser Arbeit der Visualisierung. Die Ortswechsel einzelner Agenten bzw. der Mitglieder eines Haushaltes können so beobachtet werden. Die Visualisierung kann zur Plausibilitätskontrolle der Modellergebnisse eingesetzt werden. Weitere statistische Analysen als auch kartographische Produkte auf Grundlage dieser Shapefiles sind prinzipiell möglich. Die Visualisierung von Daten wurde mit der Version 10 von ArcGIS verbessert. So besitzen Layer jetzt explizit eine Eigenschaft Zeit. Jeder Datensatz hat hierzu entweder eine oder zwei (Start- und Endzeit) Zeitangaben. Aus der Mikrosimulation wird jeder Datensatz im vorliegenden Fall mit einer Zeitinformation (festgelegtes Datumsformat als string) versehen. Im ArcGIS ist es dann möglich, mittels des neu implementierten *Time Sliders*, die Daten zu animieren. Diese Animation kann des Weiteren auch in das Audio Video Interleaved Datenformat (Video-Container AVI) exportiert werden. Im Folgenden wird

noch angedeutet, wie eine Shape-Datei prinzipiell aus C# heraus erstellt werden kann (hierfür wurden bereitgestellte Funktionsbibliotheken von ESRI genutzt).

#### C#-Code

```
ESRI.ArcGIS.DataSourcesFile.ShapefileWorkspaceFactory workspaceFactory = null; workspaceFactory
= new ESRI.ArcGIS.DataSourcesFile.ShapefileWorkspaceFactoryClass();
ESRI.ArcGIS.esriSystem.IAoInitialize aoInit = new ESRI.ArcGIS.esriSystem.AoInitializeClass();
aoInit.Initialize(ESRI.ArcGIS.esriSystem.esriLicenseProductCode.esriLicenseProductCodeArcView);
ESRI.ArcGIS.Geodatabase.IFeatureWorkspace fws = workspaceFactory.OpenFromFile(Pfad_fuer_Datei,
0) as ESRI.ArcGIS.Geodatabase.IFeatureWorkspace;
ESRI.ArcGIS.Geodatabase.IFeatureClass pFeatClass = fws.CreateFeatureClass(shapeName, fieldCollec-
tion, null, null, ESRI.ArcGIS.Geodatabase.esriFeatureType.esriFTSimple, Shape_Dateiname, "") as
ESRI.ArcGIS.Geodatabase.IFeatureClass;
```

Hierzu ist das Setzen von Verweisen (auf DataSourcesFile, Geodatabase, Geometry und System) notwendig. Außerdem ist ein Anlegen von Spalten für die Attributtabelle, das Füllen dieser sowie das Setzen eines Koordinatensystems erforderlich. Dieses wird hier jedoch nicht beschrieben.

Der Energiebedarf der Haushalte kann, aggregiert auf die Rasterzellen der Stadt, in eine Polygon Shape-Datei, genauer in die entsprechende Attributtabelle, geschrieben werden. So ist es prinzipiell durch die Zeiteigenschaft eines Layers möglich, Animationen zu erzeugen.

Neben dem Export als Shapedatei ist es auch möglich, Ergebnisse direkt als dbase (.dbf) Datei zu speichern. Dieses Format kann von vielen Programmen, wie z.B. Excel, gelesen werden. Eine weiterführende Auswertung, durch z.B. Diagramme, muss somit derzeit in externen Programmen erfolgen. Für die Erzeugung von dbf Dateien wurde in dieser Arbeit auf die freie Software DbfExporter (Lizenz LGPL) zurückgegriffen. Im konkreten Fall wurde der Quellcode des Exporters an die eigenen Vorstellungen angepasst. Der offene Zugang zum Quellcode war daher notwendig. Ganz generell ist freie Software (open Source) neben ihrer allgemeinen Bedeutung auch ein wichtiger Bestandteil der Wissenschaft. *“Der fundamentale Akt von Freundschaft unter denkenden Wesen besteht darin, einander etwas beizubringen und Wissen gemeinsam zu nutzen.... Dieser gute Wille, die Bereitschaft unserem Nächsten zu helfen, wann immer es im Bereich des Möglichen liegt, ist genau das, was die Gesellschaft zusammenhält und was sie lebenswert macht.”* (Richard Stallmann 1999 - vgl. [66], Grassmuck, S.224).

Ellegård und Palm visualisieren Aktivitäten zusammen mit Energiebedarfen (vgl. [49], Ellegård u. Palm) während eines Tages mittels der eigens entwickelten Software *VISUAL-TimePACTS/energy use*. Eine räumliche Auflösung findet dabei nicht statt. Die Aktivitäten von Individuen werden als gestapelte Säulen veranschaulicht. Entsprechende Energiebedarfe von Haushalten werden als gestapelte Balken visualisiert.

Die Visualisierung von Ergebnissen ist für diese Arbeit angemessen auf den 2D Bereich beschränkt. Weiterführende Möglichkeiten der Visualisierung im urbanen Kontext für den 3D Bereich wurden u.a. von Faller untersucht (vgl. [55], Faller). Die Analysen von Visualisierungsmöglichkeiten beziehen sich bei Faller auf Stadtrhythmen am Beispiel der Stadt Wien. So wird unter anderem die Bevölkerungsdichteverteilung im Tagesverlauf durch *morphing* von erstellten *Meshs* vorgestellt. Shaw et. al stellen ein generalisiertes Raum-Zeit Pfadkonzept vor, das auf Hägerstrands Zeitgeographie basiert (vgl. [149], Shaw u. a.). Die Pfade werden dabei durch Shaw et al. in einer eigens entwickelten ArcGIS Erweiterung analysiert und 3D visualisiert.

Visualisierung ist ein weites Forschungsgebiet. Die Möglichkeiten der Visualisierung, selbst für Fragestellungen dieser Arbeit, können und sollen nicht umfassend dargestellt werden. Es sei in diesem Zusammenhang abschließend auf Vrotsou, Johannsson und Cooper verwiesen, die Tätigkeitssequenzen als Graphen darstellen (vgl. [169], Vrotsou u. a.). Sie nutzen ein selbst geschriebenes Werkzeug (ActiviTree), durch das die Graphen, genauer gesagt Bäume, erzeugt werden. Dies ist eine interessante Möglichkeit Sequenzen mit ihrer Häufigkeit zu erfassen. Darüber hinaus könnte man Graphen, die auf Zeitbudgetdaten beruhen mit Graphen, die das Ergebnis von Simulationen sind, hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit vergleichen.

#### 5.4.11 Modellergebnisse

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse von zwei Simulationsdurchläufen vorgestellt. Aus der Bandbreite an denkbar möglichen Szenarien wurde sich für zwei Varianten entschieden. Es werden zwei sich markant unterscheidende urbane Formen betrachtet. Des Weiteren unterscheiden sich die betrachteten Szenarien hinsichtlich des Umweltfaktors Wetter, so dass ein sonniger und ein nicht sonniger Tag simuliert werden. Die übrigen Szenariobedingungen bleiben, unter der Berücksichtigung der stochastischen Komponenten, konstant. Die grundlegenden Szenariobedingungen sind in nachfolgender Tabelle 5.3 aufgelistet.



**Tabelle 5.3:** Szenarienbeschreibung

Parameter	Szenario1	Szenario2
Gesamtbevölkerung	984	981
Einpersonenhaushalte	199	199
Zweipersonenhaushalte	176	181
Dreipersonenhaushalte	67	60
Vierpersonenhaushalte	58	60
Tag der Simulation	1. Juni	1. Juni
Sonnenaufgang	3:41	3:41
Sonnenuntergang	20:30	20:30
Wetterbedingung	sonnig	nicht sonnig

Wie aus Tabelle 5.3 ersichtlich ist, wird die Simulation erst einmal auf eine kleinere Anzahl von Haushalten beschränkt, um die prinzipielle Nutzbarkeit dieser Methodik darzustellen. Eine größere Anzahl von Agenten könnte jedoch ohne größere Beschränkungen simuliert werden, um reale Stadtgrößen abzubilden. Die prozentuale Aufteilung der Personenhaushalte kann durch den Nutzer im GIS festgelegt und exportiert werden. In diesem Beispiel orientiert sich die Aufteilung der Haushaltsgröße an den durchschnittlichen Zahlen für Deutschland<sup>111</sup>. Die Zeiten für Sonnenauf- und Untergang können für einen gegebenen Ort und ein vorgegebenes Datum mit einer für diese Arbeit ausreichenden Genauigkeit bestimmt werden (vgl. Kapitel 5.4.7.3). Diese Zeiten sind vor allem als potentielle Beleuchtungszeiten von Bedeutung. Der Tag der Simulation wird für die Berechnung des Sonnenauf- und untergangs benötigt. Ansonsten ist diese Tagesangabe nur als Typtag interessant, so dass z.B. ein typischer Sommertag simuliert werden kann.

#### 5.4.11.1 Szenario 1

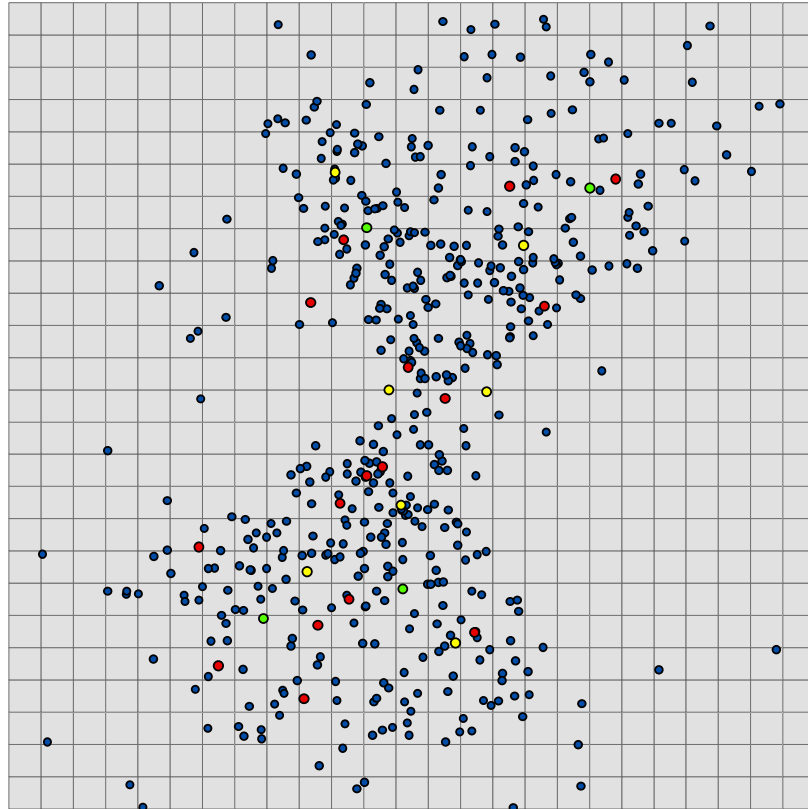
In diesem Szenario wurde der Simulation eine Siedlung zugrunde gelegt, die in Ihrer Form stark sektoral geprägt ist (vgl. Sektorenmodell Kapitel 2). Die Verteilung der Haushalte ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

---

<sup>111</sup>Nach Daten des statistischen Bundesamtes sind in Deutschland 40% der Haushalte Einfamilienhaushalte, 34% Zweifamilienhaushalte und jeweils 13% Drei- sowie Vier- und Mehrpersonenhaushalte.



**Abbildung 5.10:** Urbane Form in Szenario 1



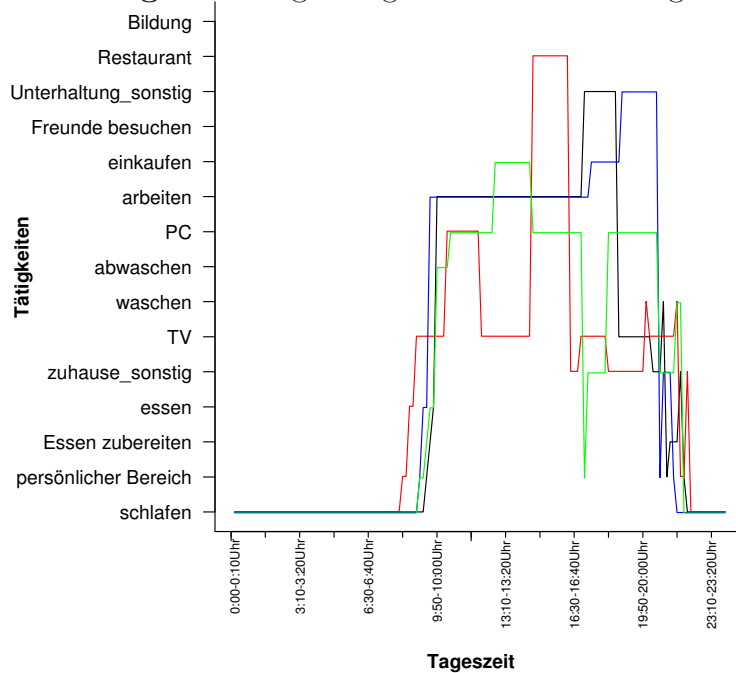
Derart sektoral ausgeprägt sind reale Siedlungen vermutlich nicht zu finden. Der Vorteil von Simulationen ist jedoch, dass alle erdenklichen Situationen mit ihren Auswirkungen analysiert werden können. Abbildung 5.10 zeigt entsprechend der sektoral ausgeprägten Form die städtische Verteilung von Gebäuden/Wohnraum. Neben den Wohnplätzen (blau) sind die Points of Interests (rot) sowie die vorhandenen Arbeitsstätten (gelb) und Schulen (grün) ausgezeichnet<sup>112</sup>.

Die Aktivitäten der künstlich erzeugten Stadtbevölkerung wurden, basierend auf den in Tabelle 5.3 ausgewiesenen Angaben, simuliert. Zu beachten ist, dass die Stadtform in erster Linie einen Einfluss auf Distanzen hat. Weiterführende Einflüsse von Stadtstrukturen auf Aktivitätenprogramme wurden nicht simuliert und bleiben somit der weiteren Forschung überlassen. In der nachfolgenden Abbildung sind vier zufällig gewählte Tagesaktivitätenprogramme von Agenten dargestellt (vgl. Abb. 5.11).

---

<sup>112</sup>Die in den Abbildung 5.10 und 5.14 dargestellten Rasterzellen haben eine Länge und Breite von 250 m.

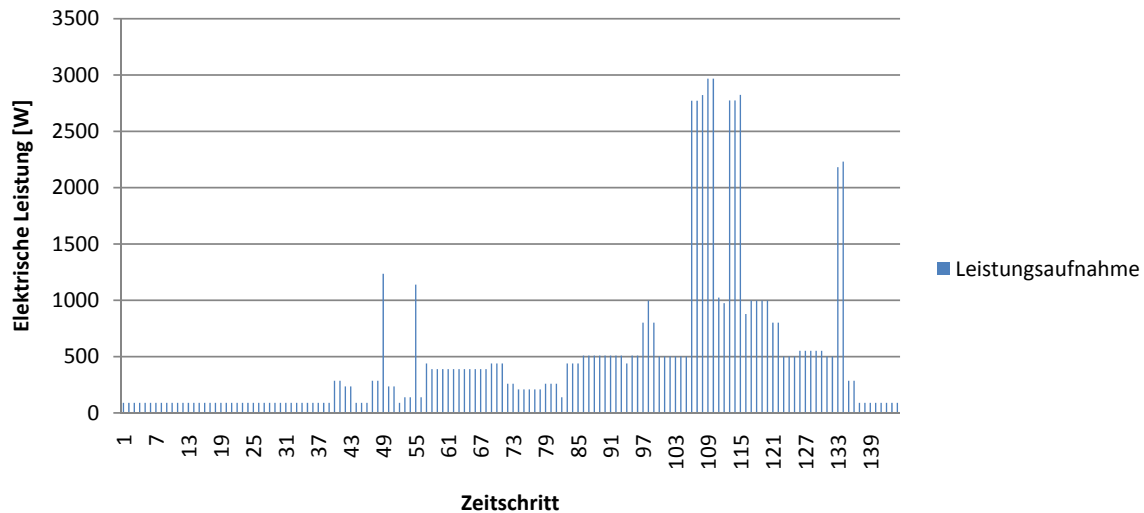
**Abbildung 5.11:** Tagedätigkeiten simulierter Agenten



Aus der Graphik ist ersichtlich, dass die Agenten zu verschiedenen Zeiten aufstehen und wieder schlafen gehen. Eine derzeitige Unzulänglichkeit ist es, dass nachts bis auf *Schlafen* keine weiteren Tätigkeiten ausgeführt werden können. Auch die Bereiche *Essen* und *Essen zubereiten* müssten mitunter noch stärker im Modell fixiert werden, um plausible Resultate zu erzeugen. Ansonsten liefert die Simulation jedoch schon mit einfachen Annahmen realitätskonforme Ergebnisse. Wie schon im Laufe der Arbeit angemerkt, wird die in den Zeitbudgetdaten erfasste Vielzahl der Tätigkeiten durch die Simulation nicht wiedergegeben. Dies ist jedoch im Kontext dieser Arbeit auch nicht notwendig, da vordergründig Tätigkeiten mit direktem Energiebezug von Bedeutung sind.

Basierend auf den simulierten Tagesaktivitäten, wurden diese mit plausiblen Energiebedarfen gekoppelt. In der nachfolgenden Abbildung ist in diesem Zusammenhang die elektrische Leistungsaufnahme eines zufällig gewählten Vierpersonenhaushaltes dargestellt.

**Abbildung 5.12:** Tageslast eines Vier-Personenhaushaltes



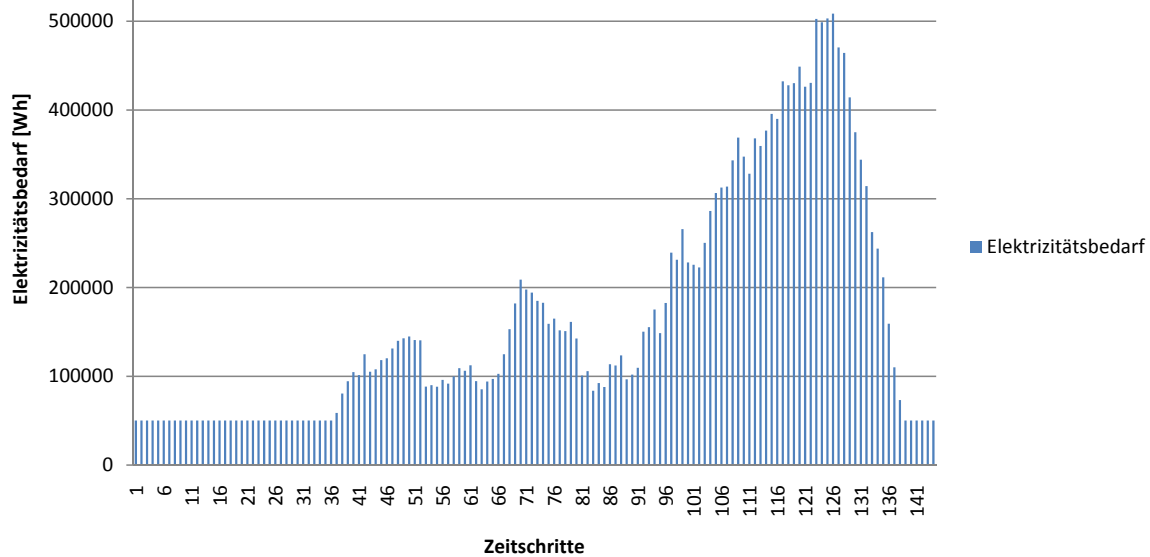
In Abbildung 5.12 ist der Stromverbrauch im Standbybetrieb durch konstante Werte zu Beginn und zum Ende des Tages gut erkennbar. Eine bessere Übereinstimmung mit der Realität kann durch stochastisch leicht schwankende Werte implementiert werden<sup>113</sup>. Im Tagesverlauf sind größere Leistungsschwankungen, wie sie real auftreten, ersichtlich. Dabei soll angemerkt sein, dass deutlich größere Leistungsspitzen in einem 4-Personenhaushalt auftreten können. Im Allgemeinen sind reale Lastverläufe noch deutlich fluktuierender. Dass dies im Moment so noch nicht durch die Simulation gezeigt wird, liegt vor allem an nicht in das Modell integrierten Kleinstgeräten. So ist z.B. ein Fön ein Gerät, welches auf Grund seiner Leistung (z.B. 2000 W) eigentlich nicht vernachlässigbar ist. Die Plausibilitätsprüfung von Lastgängen kann durch eine Vielzahl von Simulationsdurchläufen und eine Hochrechnung auf Jahresenergieverbräuche erfolgen, welche dann mit statistischen Energieverbräuchen verglichen werden können (vgl. [75], Herrmann).

Die nachfolgende Abbildung beschreibt den Energiebedarf des Haushaltssektors. Dazu werden die simulierten Haushalte aggregiert betrachtet (vgl. Abb. 5.13).

---

<sup>113</sup>Bei Kühlgeräten kann des Nachts durch fehlendes Öffnen und Schließen sogar von relativ gleich getakteten Kühlintervallen ausgegangen werden (zyklisch).

**Abbildung 5.13:** Elektrizitätsbedarf aller Haushalte im Tagesverlauf - Szenario 1

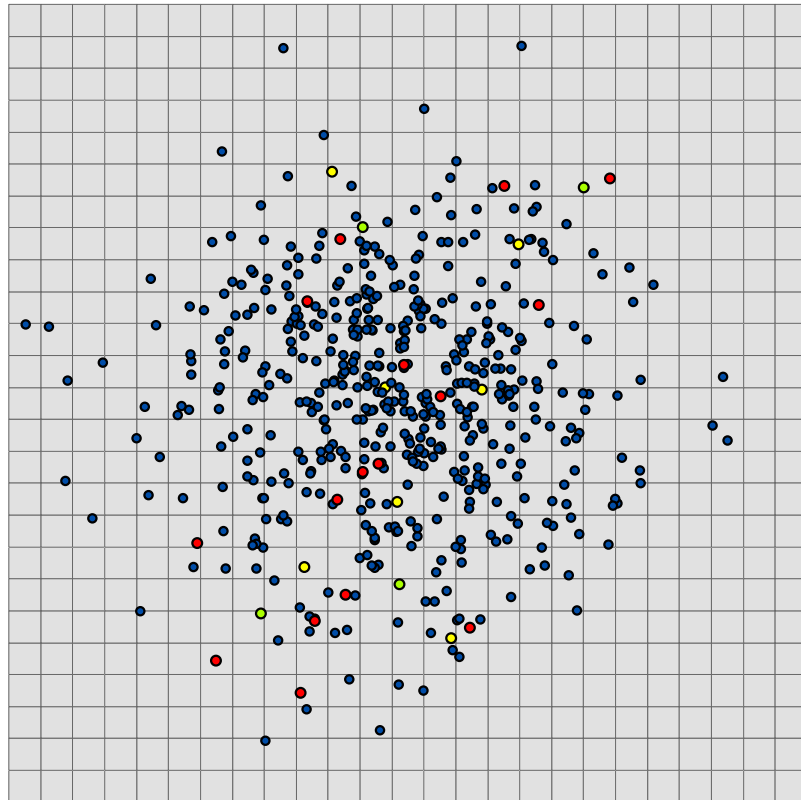


Im Vergleich zu dem im folgenden Unterkapitel 5.4.11.2 dargestellten Szenario 2 wurde in diesem Simulationsdurchlauf ein ca. 6% geringerer Energiebedarf für alle Haushalte ermittelt. Die größte Bedarfsspitze übersteigt jedoch die des zweiten Szenarios. Ein geringerer Bedarf in diesem Szenario war zu erwarten, da Außer-Haus-Tätigkeiten an einem sonnigen Tag einen höheren Stellenwert erhielten und Energiebedarfe für Haushalte bisher nur mit innerhäuslichen Tätigkeiten assoziiert werden. In der Realität dürften die Bedarfsunterschiede zwischen den unterstellten Szenariotypen noch größer sein. Die Ergebnisse unterliegen jedoch einer stochastischen Komponente. Ein Monte-Carlo Versuch im Zusammenhang mit einem Vergleich zu vorliegenden realen Daten könnte Aufschluss über die Plausibilität der erzielten Simulationsergebnisse geben.

#### 5.4.11.2 Szenario 2

In diesem Szenario wird eine von Szenario 1 abweichende Stadtstruktur unterstellt, die in Abbildung 5.14 dargestellt ist.

**Abbildung 5.14:** Urbane Form in Szenario 2



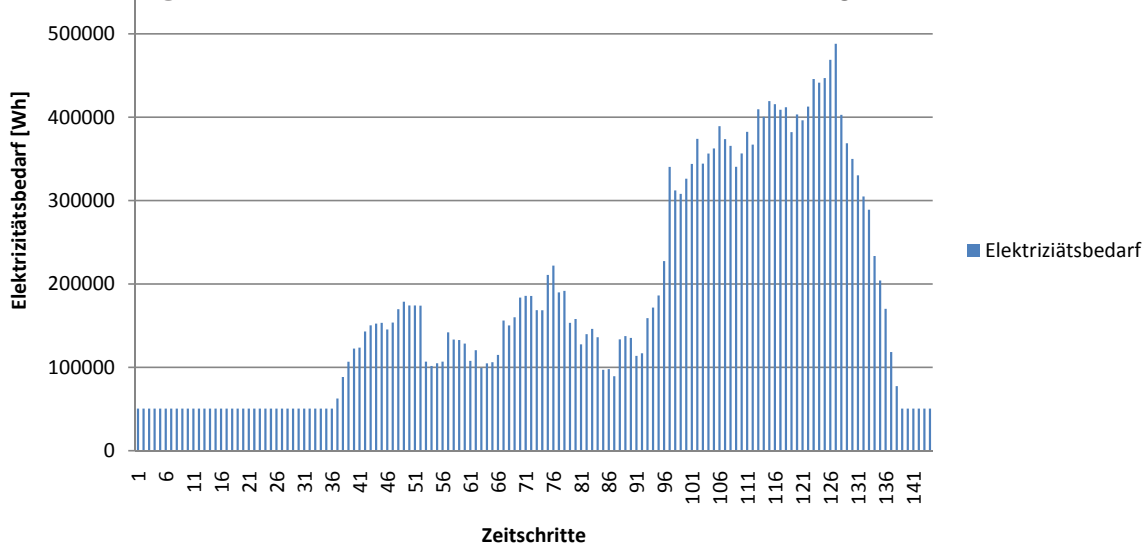
Die in dieser Grafik dargestellte Stadtform ist wiederum zufällig erzeugt. Dabei wurden Sektoren bevorzugter Ansiedlung verboten. Im Zentrum ist eine leichte Konzentration der Besiedlung erkennbar. Diese Stadtform steht, im Gegensatz zu der Form aus Szenario 1, viel eher im Einklang mit realen Siedlungsstrukturen. In diesem Szenario wurde lediglich die Verteilung der Wohnstätten verändert. Die Festlegung der Points of Interest sowie der Arbeitsstätten entspricht der Verteilung aus Szenario 1. Die Siedlungsstruktur hat somit in diesem Simulationsdurchlauf erst einmal nur einen Einfluss auf die zurückzulegenden Distanzen.

Da die Haushaltstätigkeiten, wie z.B. Fernsehen, nicht durch die Stadtform beeinflusst werden, wird auf eine Abbildung der Tätigkeiten analog zu dem ersten Szenario verzichtet. Eine Beeinflussung der Tagesaktivitäten durch die Stadtstruktur ist vor allem durch die städtische Ausstattung gegeben. Verbesserte Freizeitmöglichkeiten, wie das Vorhandensein von Kinos, Schwimmbädern usw. beeinflussen Aktivitätenprogramme. Die Simulation von abweichenden Infrastrukturausstattungen unter ansonsten gleichen

Randbedingungen fand innerhalb dieser Arbeit nicht statt und bleibt zukünftigen Untersuchungen überlassen.

Analog zu Szenario 1 wird in der folgenden Abbildung der Gesamtenergiebedarf des Haushaltssektors für einen Simulationsdurchlauf dargestellt (vgl. Abb. 5.15).

**Abbildung 5.15:** Elektrizitätsbedarf aller Haushalte im Tagesverlauf - Szenario 2



Wie schon in Szenario 1 erwähnt, unterscheiden sich die Abbildungen 5.13 und 5.15 nicht wesentlich. In diesem Szenario ist der Energiebedarf, wie erwartet, höher als im Referenzszenario. Gut erkennbar sind wieder die konstanten Energiebedarfe in den Nachtstunden, die durch die Standby-Geräte verursacht werden. In der Realität gibt es durch verschiedene ausgeführte Tätigkeiten hervorgerufene Schwankungen der Nachfrage. Prinzipiell kann festgestellt werden, dass verschiedene Verbrauchsspitzen zwar wiedergegeben werden, aber das Verhältnis zwischen den Maximas viel zu stark ausgeprägt ist (vgl. Abb. 5.9).

Auf Grund der noch stark vereinfachten Annahmen wurden die Standardlastprofile nicht korrekt nachgefahren. Aber gerade da schon mit einfachen Mitteln plausible Ergebnisse erzielt werden können, ist davon auszugehen dass der hier vorgestellte Ansatz weiter ausdifferenziert werden sollte.

### 5.4.12 Modellbewertung

Dieser Abschnitt beinhaltet die Bewertung des hier vorgestellten Modellansatzes. Motivation für die Beschäftigung mit Modellen und Simulation ist im Kontext dieser Arbeit besonders der Mangel an geeigneten computergestützten Werkzeugen für die Erfassung des Energiebedarfes von Siedlungen. In vorhandenen Modellen wird der Raum als Modellkomponente häufig nicht betrachtet. Auch bilden existierende Modelle oft nicht die Mikroebene ab bzw. sind nur für sehr spezielle Anwendungsgebiete geschaffen. Das vorliegende Modell folgt einem holistischen Ansatz, in dem versucht wird, die Tagesaktivitäten und Bedürfnisse der Menschen zu verstehen, abzubilden und mit Energiebedarfen in Beziehung zu setzen. Das Modell hat somit das langfristige Ziel Energieflüsse und deren mögliche Veränderungen zu simulieren. Das Modell ist auf den Haushaltssektor beschränkt und erfasst lediglich direkte Energieverbräuche. Langfristig sollen zusätzlich zur Elektrizitätsnachfrage, der Wärme- und Kühlbedarf sowie Energie für Transporte integriert werden.

Die ersten Schritte hin zu einem solchen umfassenderen Modell wurden in dieser Arbeit getan. Es konnte plausibel aufgezeigt werden, dass Mikrosimulationen basierend auf objektorientierter Programmierung eine geeignete Herangehensweise für die Beschreibung städtischer Energieflüsse sind. Des Weiteren konnte der Mehrwert durch die Anbindung eines geographischen Informationssystems aufgezeigt werden. Dieser Mehrwert ist vor allem darin begründet, dass vorhandene Daten, die beispielsweise durch städtische Behörden vorgehalten werden, genutzt, dass Daten visualisiert (Kontrollfunktion) und dass Simulationsergebnisse mit GIS Funktionalitäten weiter bearbeitet werden können. Im Bereich der eigentlichen Simulation wurde deutlich, dass die Verwendung von *Markovketten* im Zusammenspiel mit *Computational Process Modeling* geeignet ist, Aktivitäten abzubilden. Die Nutzung von Markovketten trägt dem Umstand Rechnung, dass Entscheidungen von Individuen zufällig sind oder zumindest zufällig erscheinen. Neben der Zufallskomponente folgen Tagesabläufe zu großen Teilen vorgegebenen Mustern. Diese alltäglichen Abläufe können durch die Nutzung von Regeln berücksichtigt werden. Die *Gedächtnislosigkeit* von Markovketten kann durch die Mitführung vergangener Tätigkeitsentscheidungen (z.B. in Form eines Feldes) behoben werden.

Neben der Einbeziehung eines GIS konnte der prinzipielle Nutzen von Zeitbudgetdaten für Betrachtungen im Energiebereich und spezieller als Datenhintergrund für Simulationen aufgezeigt werden. Dabei sind insbesondere die Möglichkeiten der Validierung zu

nennen. Einschränkend sei jedoch angemerkt, dass die Daten dabei zum Simulationskontext passen sollten, was häufig nicht gegeben ist.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell schafft eine Grundlage für die Abbildung von Energieflüssen im Haushaltsektor von Städten, das zukünftig erweitert und verbessert werden könnte. Auf Grund der komplexen Thematik kann jedoch davon ausgegangen werden, dass auch ein erweitertes Modell nie einen echten Endpunkt erreichen wird. Dies kann dadurch begründet werden, dass Technologien und deren Nutzung einem stetigen Wandel unterliegen.

Der langfristige praktische Nutzen der Modellierung von Energieflüssen im Haushaltssektor liegt in der Entscheidungsunterstützung städtischer Akteure. Im wissenschaftlichen Umfeld können mit Hilfe der Modellierung künstliche Stadtstrukturen untersucht werden. Durch eigens gewählte Parametrisierungen können Zusammenhänge in ihrer Stärke und ihren Auswirkungen beurteilt werden, so dass der *Analysefunktion* eine besondere Bedeutung zukommt. Durch ein besseres Systemverständnis wird ein Erkenntnisgewinn geliefert. Wie in anderen Fachrichtungen auch, wird ein Mehrwert an Verständnis nur durch die Verbindung von theoretischen und empirischen Forschungsergebnissen erzielt.



## 6 Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelt die Themen urbane Formen und Zeitverwendung von Individuen vor dem Hintergrund energierelevanter Fragestellungen und führt sie in einer Mikrosimulation zusammen. Im Verlauf der Arbeit wurden an verschiedenen Stellen bereits die Grenzen der eigenen Herangehensweise aufgezeigt und Hinweise für weitere Betrachtungen gegeben. Einige dieser Aspekte werden nachfolgend noch einmal aufgegriffen.

Die Thematiken Form und Zeit wurden in den ersten Kapiteln unabhängig voneinander betrachtet. Ein besseres Verständnis des Zusammenwirkens dieser Größen ist für vielfältige Fragestellungen notwendig. Aufgrund der kostenfreien Verfügbarkeit sowie der großflächigen Gebietserfassung wurden in dieser Arbeit CORINE Landcover Daten genutzt, um urbane Formen zu beschreiben. Für detailliertere Betrachtungen urbaner Strukturen sollten zusätzlich Satellitendaten herangezogen werden, die nicht, wie die CORINE Daten, bereits klassifiziert wurden. Um eine bessere Verknüpfung von Form und Energie zu gewährleisten, ist es notwendig, Strukturen feiner aufzulösen. Dafür könnten beispielsweise 3D-Stadtmodelle als Datengrundlage dienen.

Die Nutzung sich wandelnder Kommunikations- und Informationsstrukturen und ihre Bedeutung für den Energiebereich ist ein weiterer Aspekt, der zukünftig näher beleuchtet werden sollte. Um Energieflüsse einer Stadt zu beschreiben, ist es notwendig in einer Simulation nicht nur den Haushaltssektor zu implementieren. Vielmehr sollten alle relevanten Bereiche, wie Wohnen, Gewerbe, Industrie und Transport mit den einhergehenden Energieformen Elektrizität, Wärme und Treibstoffbedarf gemeinsam betrachtet werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten Zeitbudgetdaten besitzen, bis auf das Land in dem die Befragung statt fand, keinen räumlichen Bezug. Für weitere Forschungsarbeiten wäre es sinnvoll, Tagesabläufe zum Beispiel mit Hilfe von GPS-tracks räumlich zu erfassen. Daraus resultierende Datensätze würden den Zusammenhang zwischen urbaner Form

und Mobilität klarer herausstellen. Zeitbudgeterhebungen auf städtischer bzw. regionaler Ebene wären wünschenswert, da die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulation auf städtischem Maßstab beruht. Voraussetzung hierfür wäre jedoch, dass der Datenschutz gewährleistet ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es genügend theoretischen wie praktischen Forschungsbedarf im Grenzgebiet der verschiedenen beteiligten Disziplinen (Geographie, Soziologie, Informatik, Energieforschung, ...) gibt, um die komplexen Zusammenhänge besser zu erfassen sowie diese in Simulationen abbilden zu können. Hierzu zählt beispielsweise die Untersuchung des Einflusses von Einstellungen und Lebensstil der Individuen auf den Energiebedarf oder Entscheidungsfindungsprozesse von Individuen und Haushalten. Insgesamt bildet diese Arbeit eine Grundlage auf der vielfältige Forschungsarbeiten aufsetzen können.

# Anhang

**Tabelle A1: CLC2000-Landnutzungsklassifikation(komplett)**

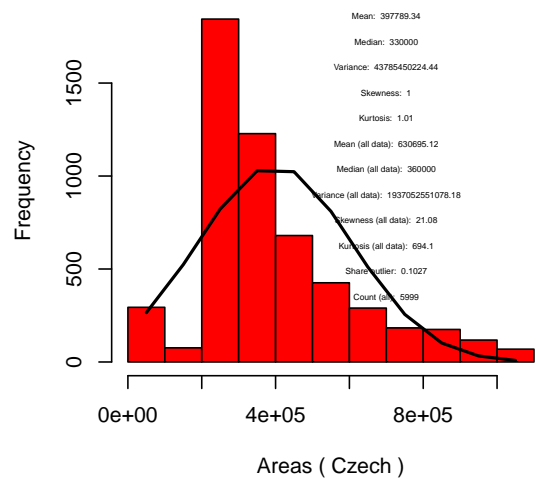
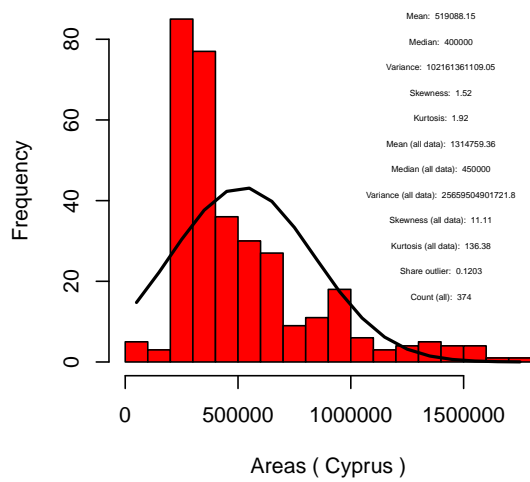
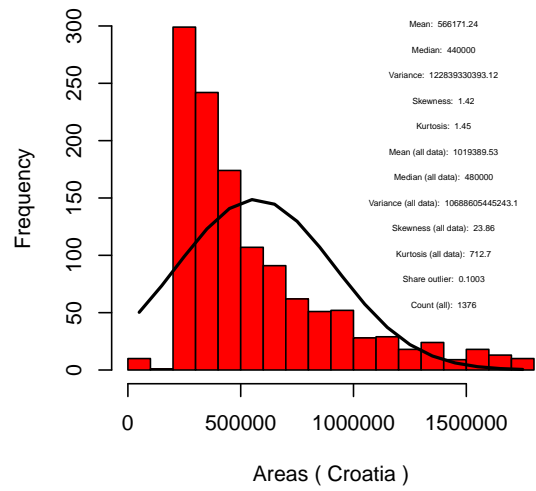
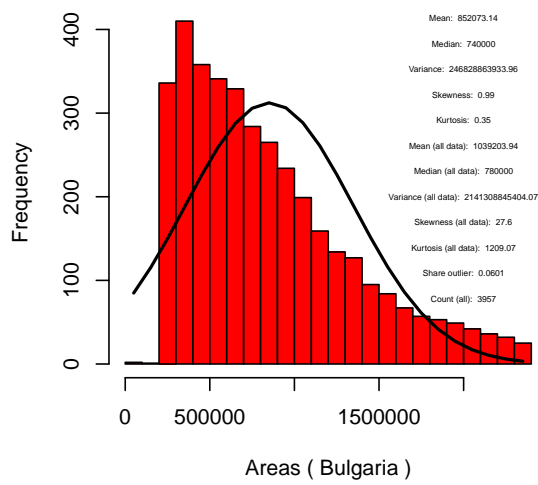
Level1	Level2	Level3	RGB
1 Artificial surfaces	11 Urban fabric	111 Continuous urban fabric	230-000-077
		112 Discontinuous urban fabric	255-000-000
	12 Industry, commercial and transport units	121 Industrial or commercial units	204-077-242
		122 Road and rail networks and associated land	204-000-000
		123 Port areas	230-204-204
		124 Airports	230-204-230
	13 Mine, dump and construction sites	131 Mineral extraction sites	166-000-204
		132 Dump sites	166-077-000
		133 Construction sites	255-077-255
	14 Artificial, non-agricultural vegetated areas	141 Green urban areas	255-166-255
		142 Sport and leisure facilities	255-230-255
2 Agricultural areas	21 Arable land	211 Non-irrigated arable land	255-255-168
		212 Permanently irrigated land	255-255-000
		213 Rice fields	230-230-000
	22 Permanent crops	221 Vineyards	230-128-000
		222 Fruit trees and berry plantations	242-166-077
		223 Olive groves	230-166-000
	23 Pastures	231 Pastures	230-230-077
	24 Heterogeneous agricultural areas	241 Annual crops associated with permanent crops	255-230-166
		242 Complex cultivation patterns	255-230-077
		Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	230-204-077
		244 Agro-forestry areas	242-204-166
3 Forest and semi natural areas	31 Forests	311 Broad-leaved forest	128-255-000
		312 Coniferous forest	000-166-000
		313 Mixed forest	077-255-000
	32 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	321 Natural grasslands	204-242-077
Fortsetzung folgt ...			

**Tabelle A1 – fortgesetzt von vorheriger Seite**

Level1	Level2	Level3	RGB
		322 Moors and heathland	166-255-128
		323 Sclerophyllous vegetation	166-230-077
		324 Transitional woodland-shrub	166-242-000
	33 Open spaces with little or no vegetation	331 Beaches, dunes, sands	230-230-230
		332 Bare rocks	204-204-204
		333 Sparsely vegetated areas	204-255-204
		334 Burnt areas	000-000-000
		335 Glaciers and perpetual snow	166-230-204
4 Wetlands	41 Inland wetlands	411 Inland marshes	166-166-255
		412 Peat bogs	077-077-255
	42 Maritime wetlands	421 Salt marshes	204-204-255
		422 Salines	230-230-255
		423 Intertidal flats	166-166-230
5 Water bodies	51 Inland waters	511 Water courses	000-204-242
		512 Water bodies	128-242-230
	52 Marine waters	521 Coastal lagoons	000-255-166
		522 Estuaries	166-255-230
		523 Sea and ocean	230-242-255
Quelle: EEA			

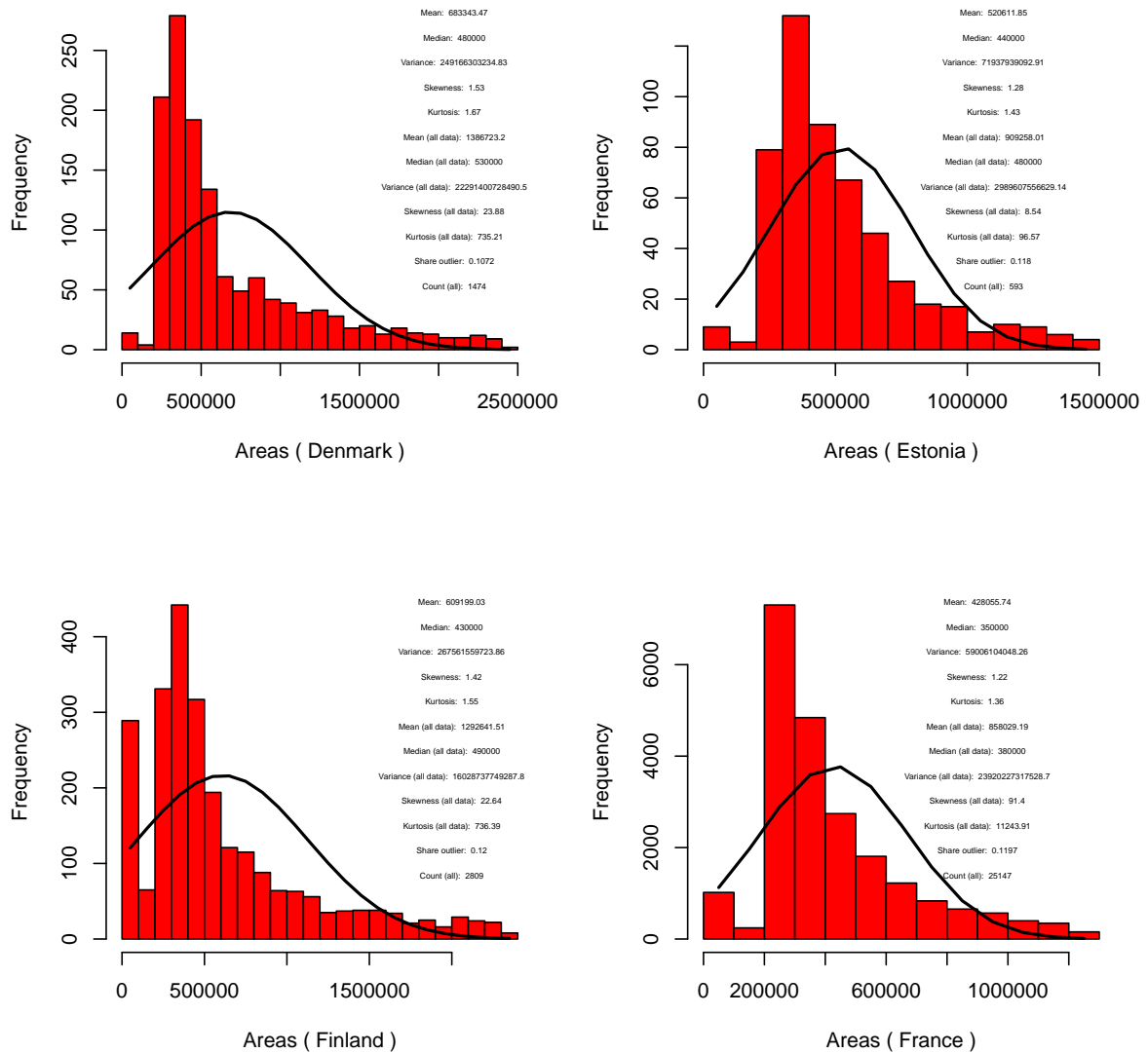
# Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

Abbildung A1: Histogramme Siedlungsverteilung (BG,HR,CY,CZ)



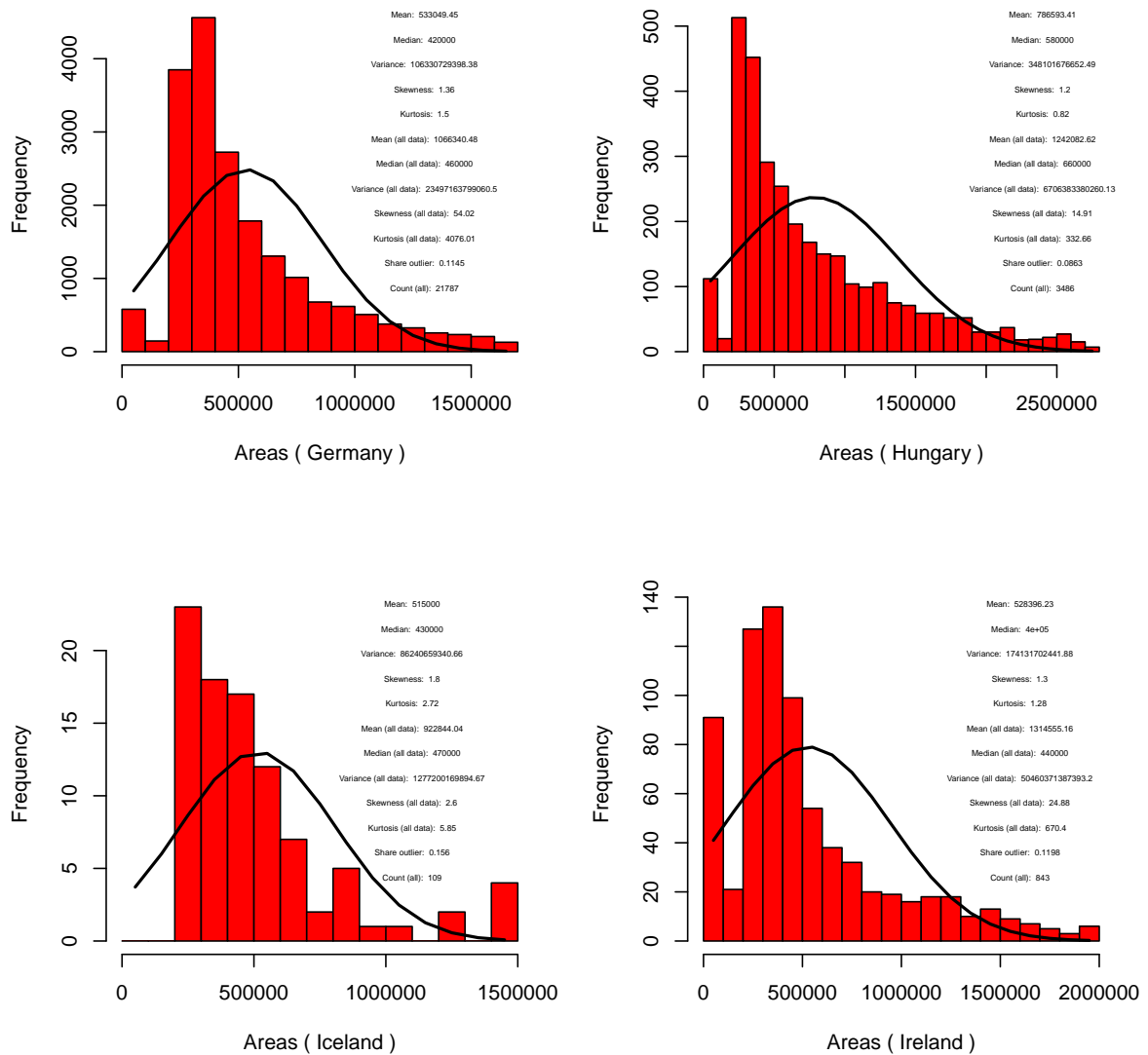
## Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

Abbildung A2: Histogramme Siedlungsverteilung (DK,EST,FIN,F)



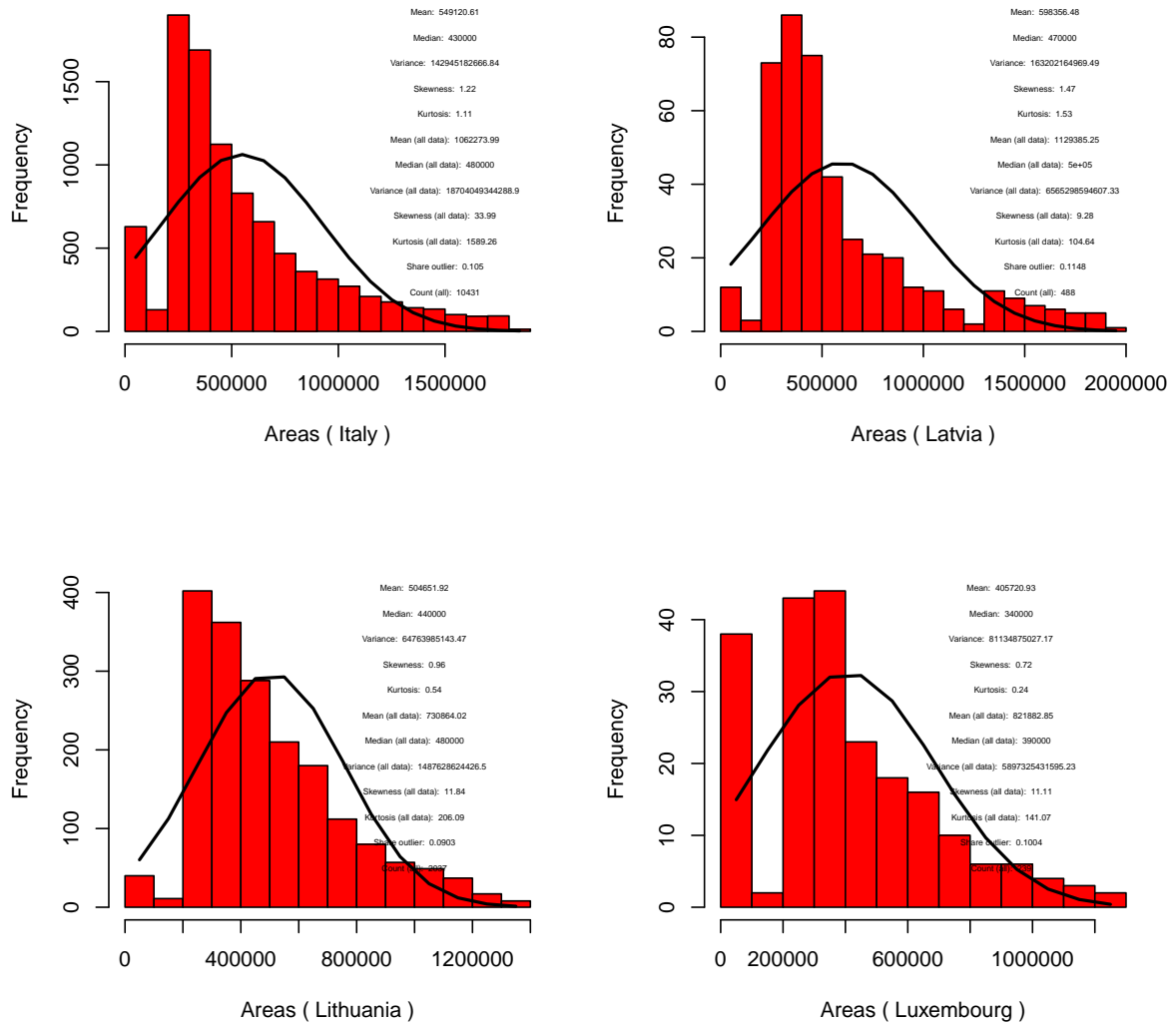
# Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

Abbildung A3: Histogramme Siedlungsverteilung (D,H,IS,IRL)



## Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

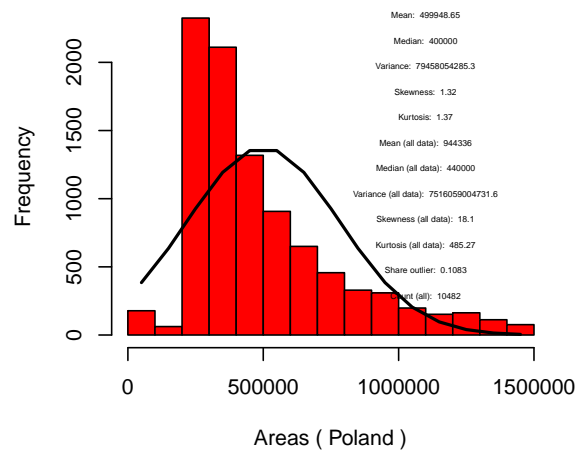
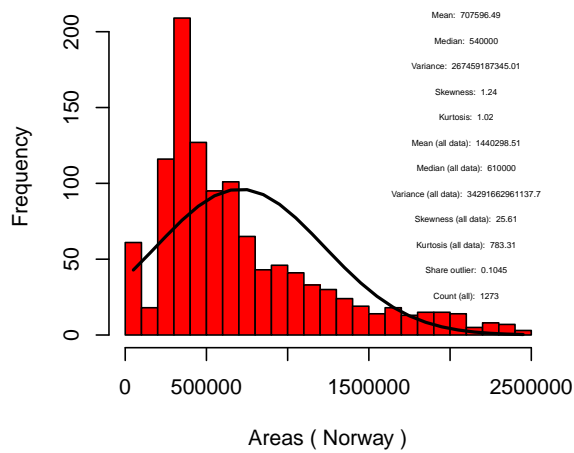
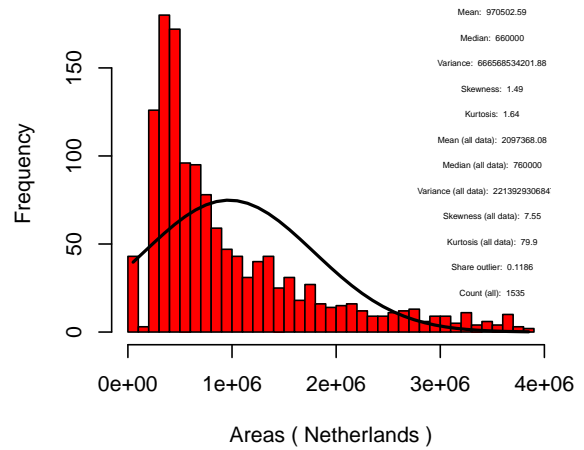
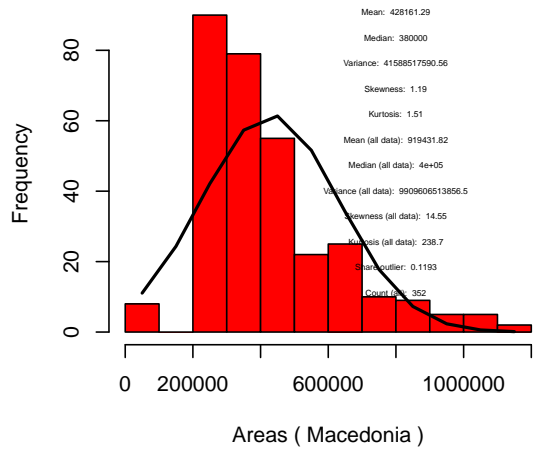
Abbildung A4: Histogramme Siedlungsverteilung (I, LV, LT, L)





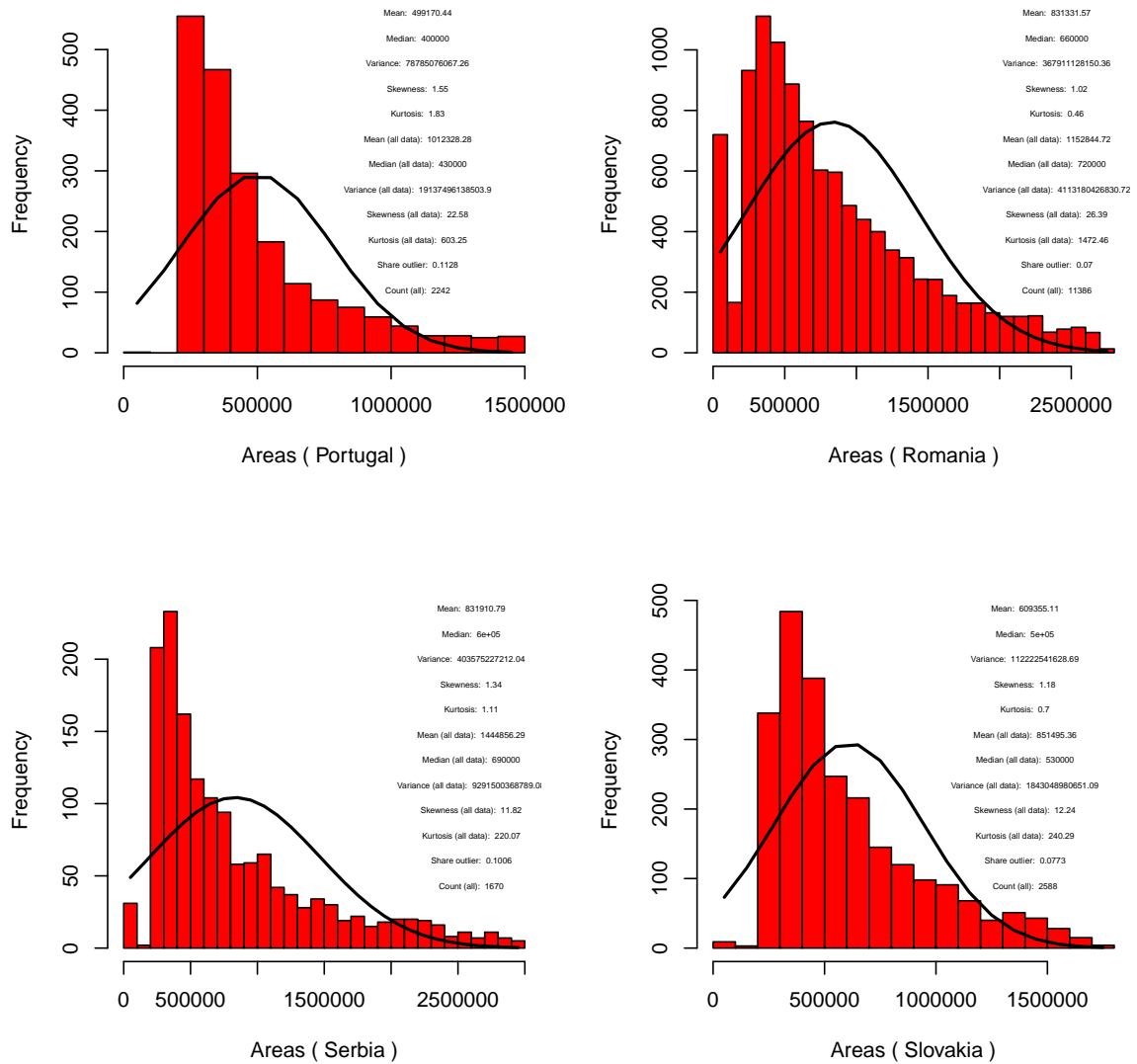
# Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

Abbildung A5: Histogramme Siedlungsverteilung (MK,NL,N,PL)



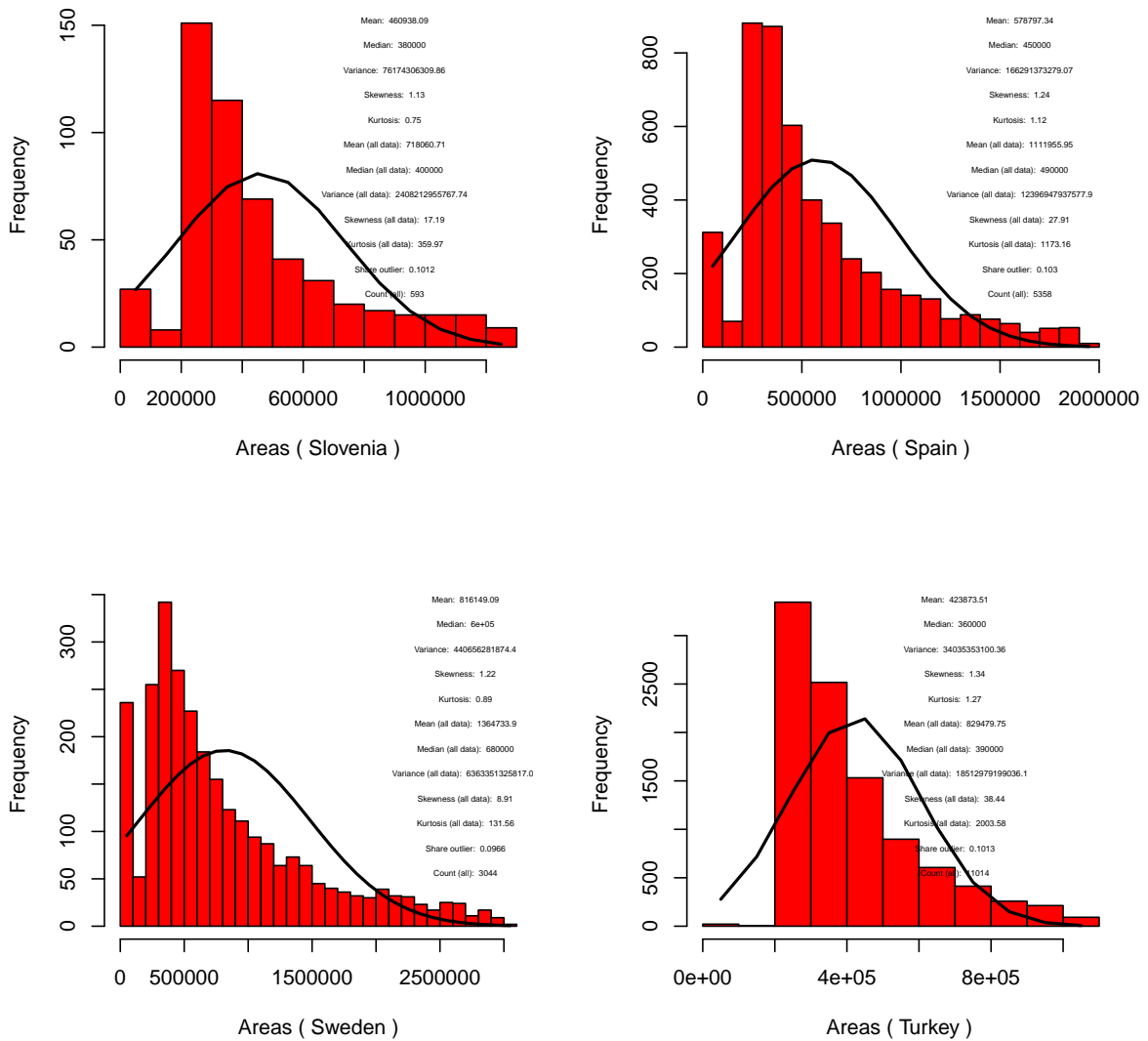
# Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

Abbildung A6: Histogramme Siedlungsverteilung (P,RO,SRB,SK)



## Histogramme der Flächenverteilung einzelner europäischer Länder

Abbildung A7: Histogramme Siedlungsverteilung (SLO,E,S,TR)



# Ranggrößenregel angewendet auf die Flächen für verschiedene europäische Staaten

Abbildung A8: Ranggrößen (Deutschland, Polen)

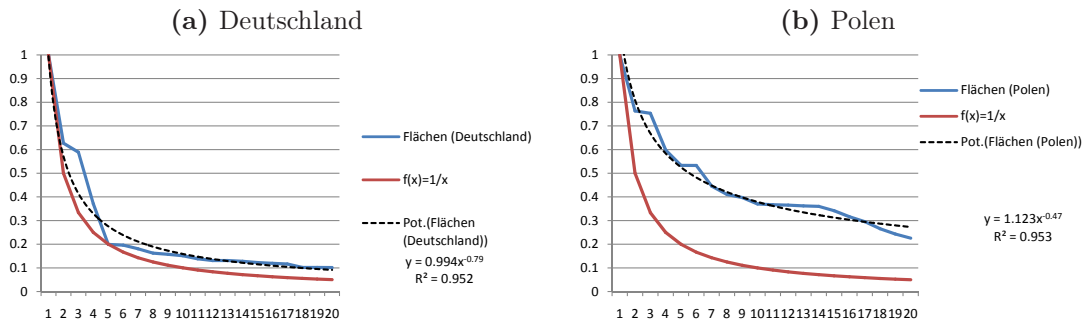


Abbildung A9: Ranggrößen (Frankreich, Rumänien)

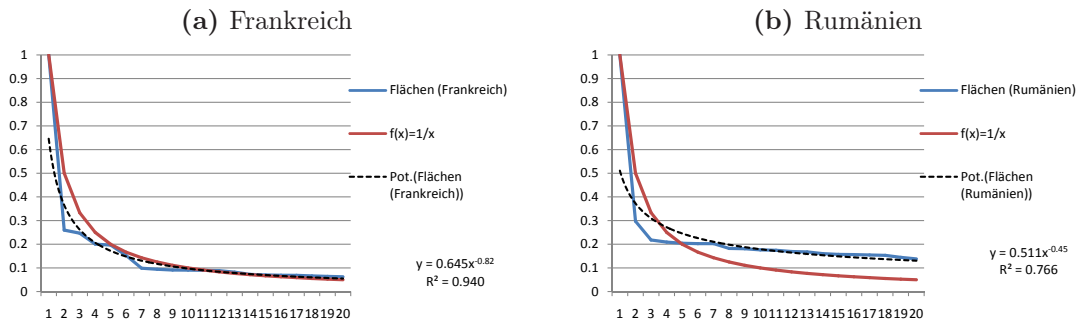
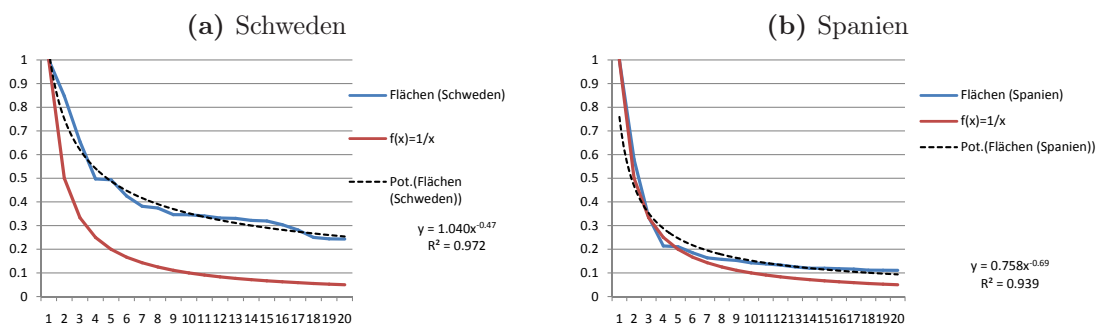


Abbildung A10: Ranggrößen (Schweden, Spanien)



Fraktale Dimension einzelner ausgewählter europäischer Gebiete

Abbildung A11: Irland - Fraktale Dimension der Siedlungen

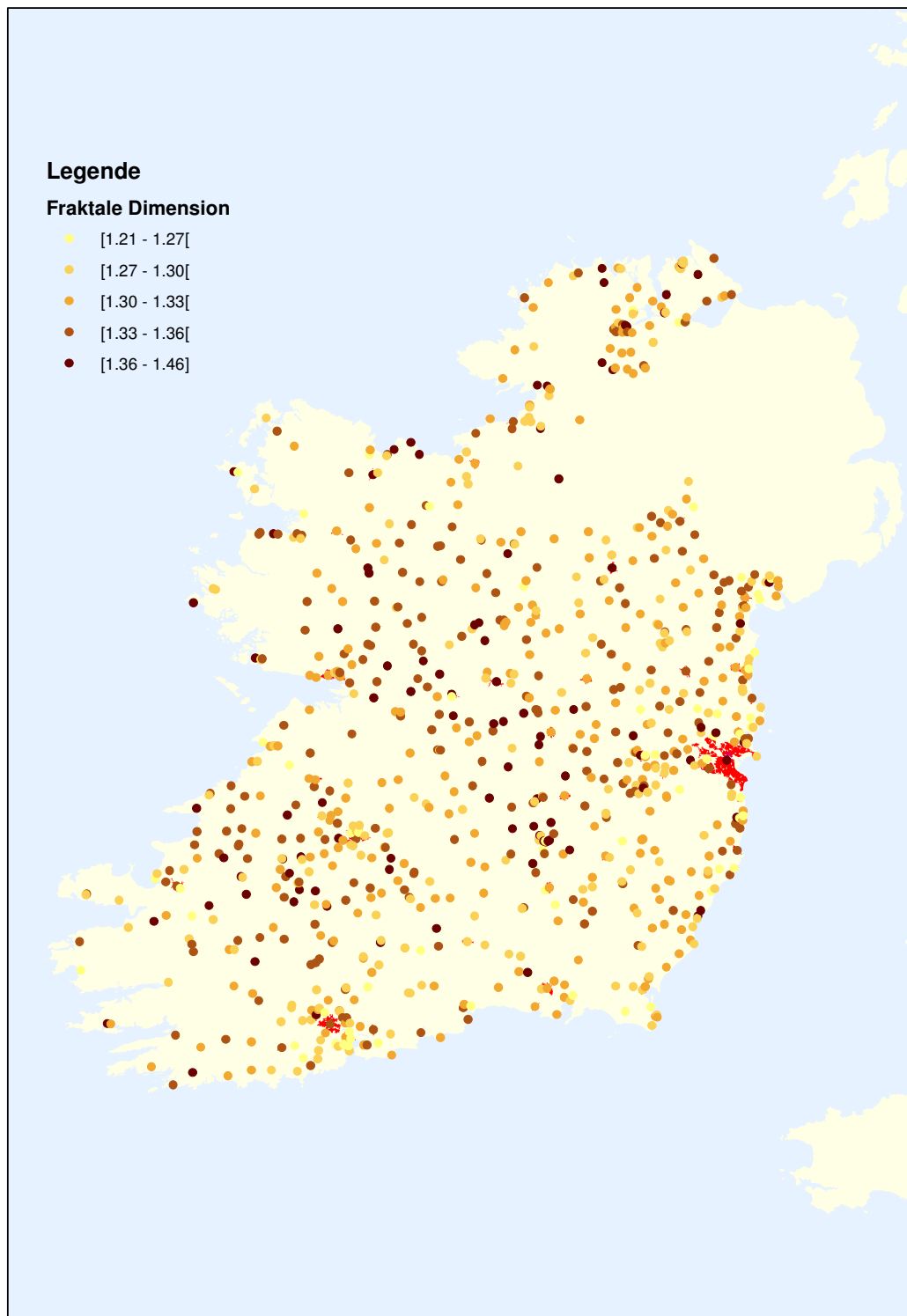


Abbildung A12: Sizilien - Fraktale Dimension der Siedlungen

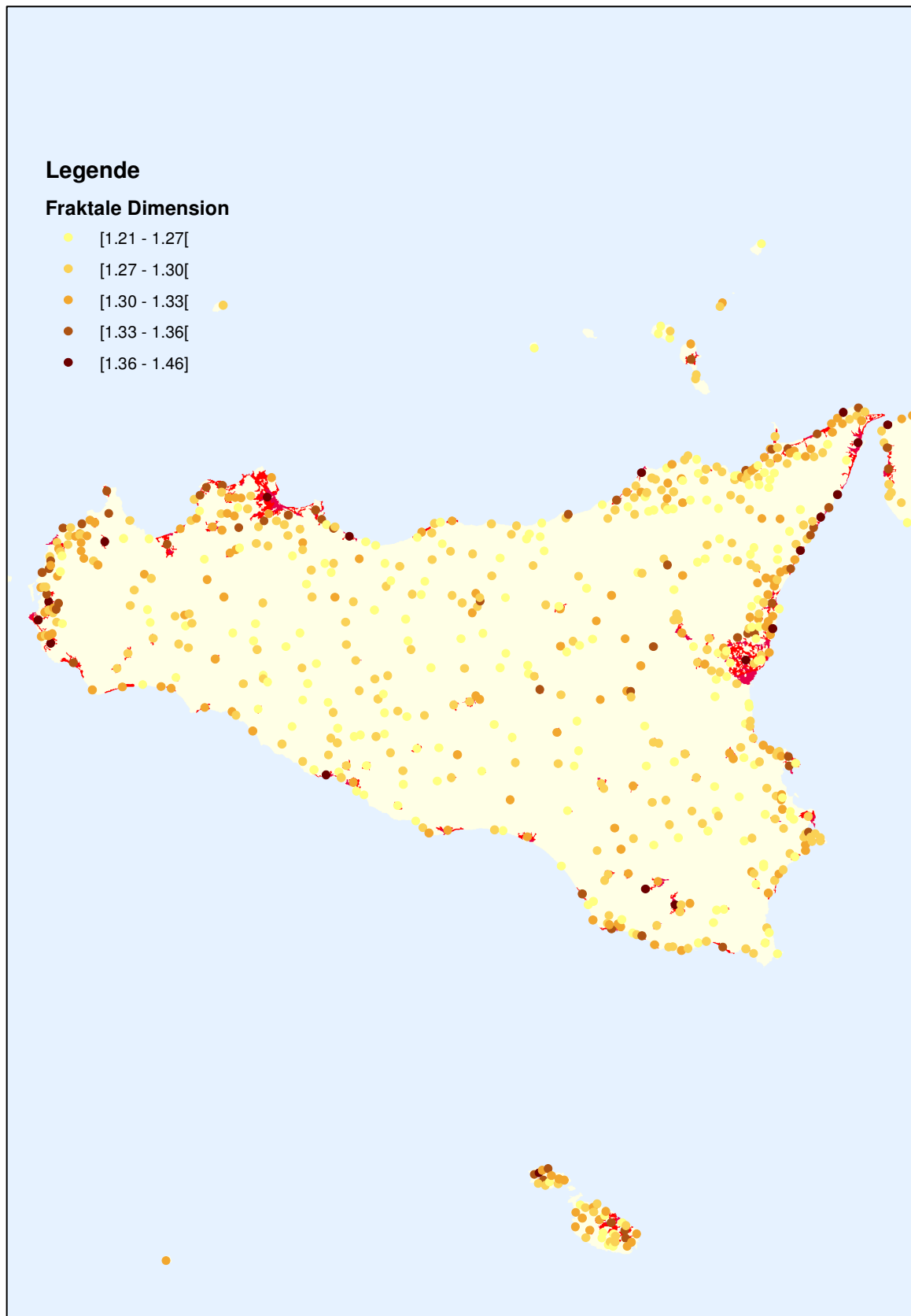


Abbildung A13: Finnland - Fraktale Dimension der Siedlungen

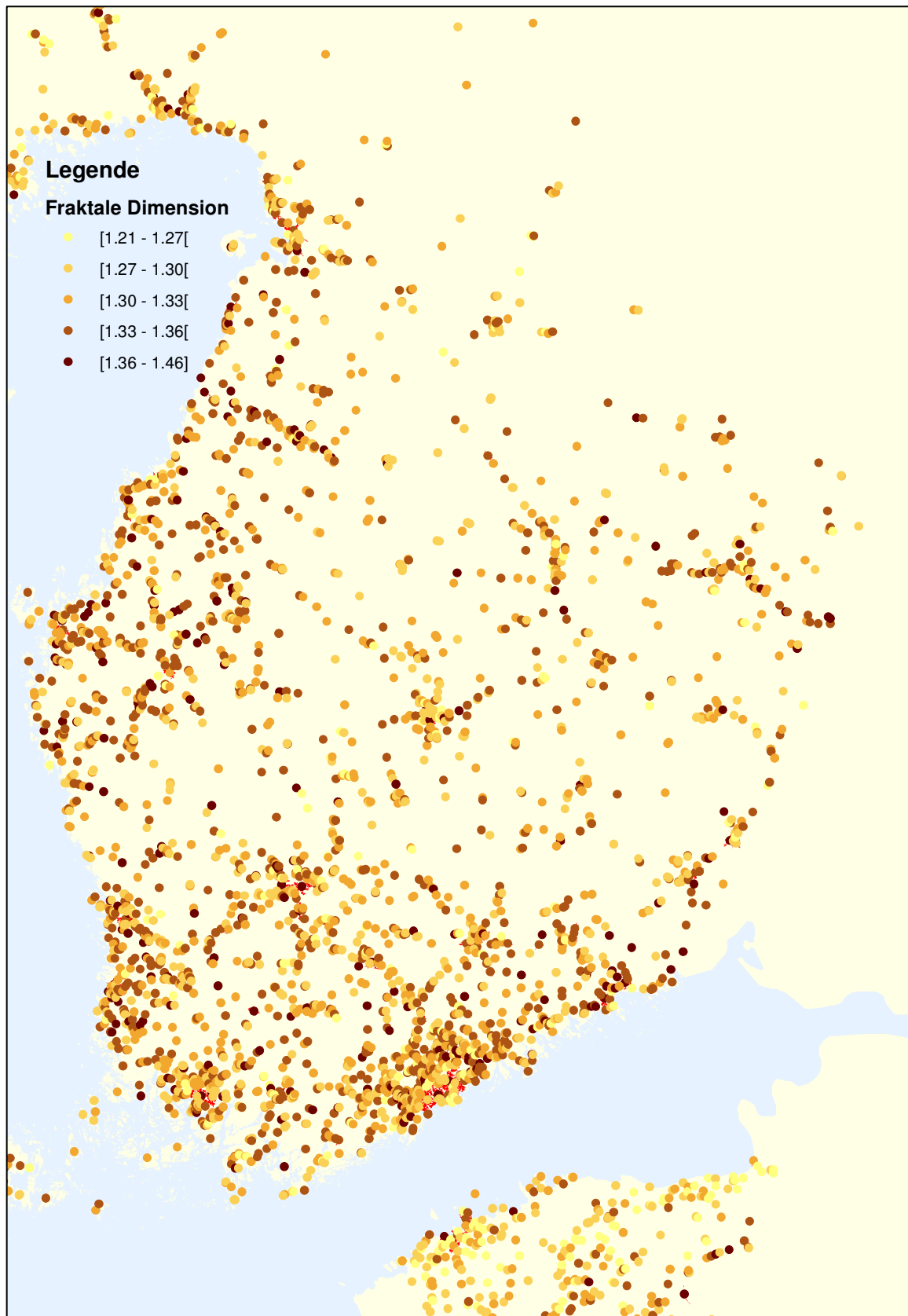
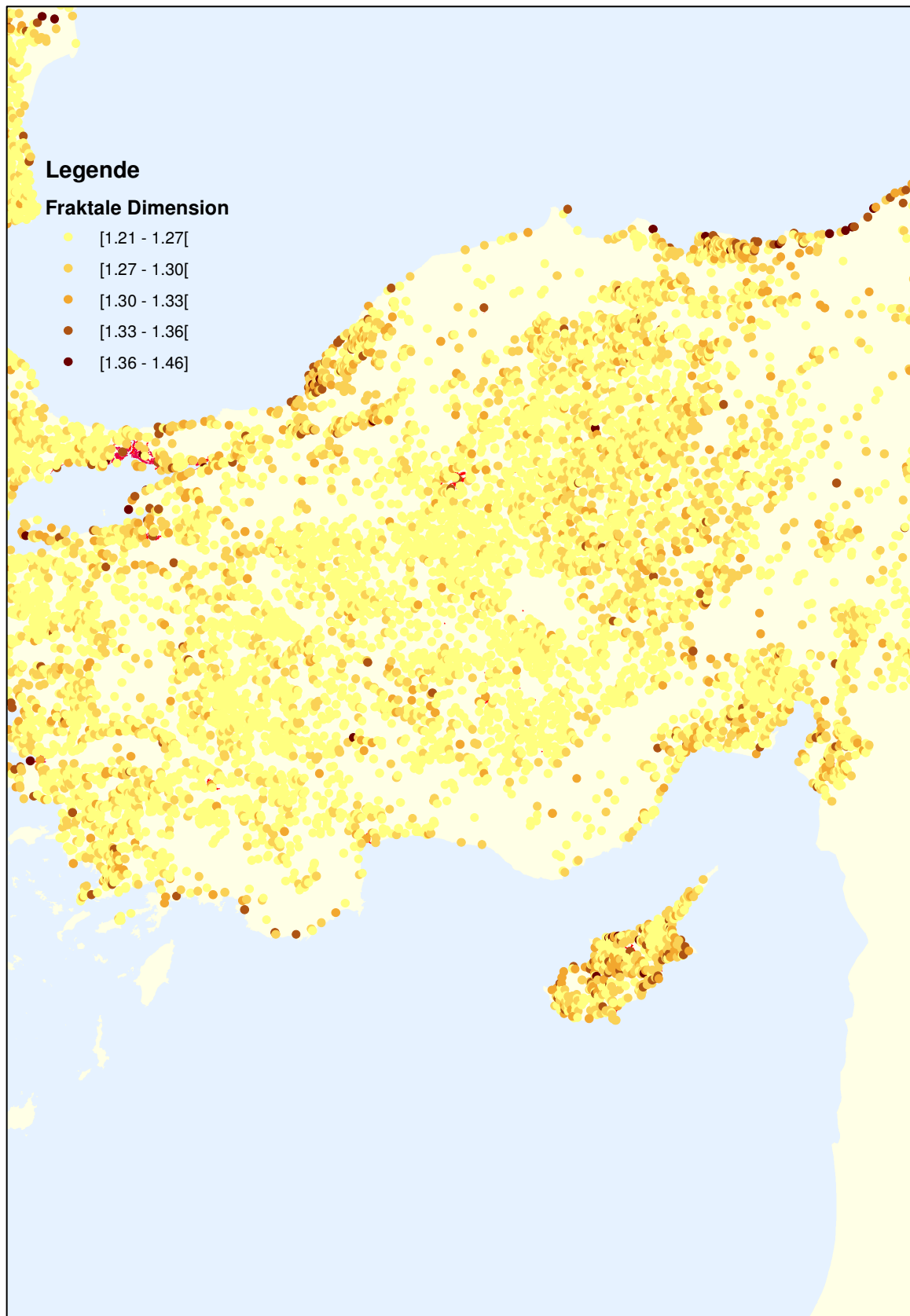


Abbildung A14: Türkei - Fraktale Dimension der Siedlungen





# Literaturverzeichnis

- [1] ALBERS, G.: *Stadtplanung - Eine praxisorientierte Einführung*. 1996
- [2] ANGEL, S. ; PARENT, J. ; CIVCO, D.L.: Ten copactness properties of circles: measuring shape in geography. In: *The canadian geographer* 54 (2010), Nr. 4, S. 441–461
- [3] ANGGRAINI, R.: *Household Activity-Travel Behaviour: Implementation of Within-Household Interactions*, Technical University Eindhoven, Diss., 2009
- [4] ARLINGHAUS, S.: Fractals take a central place. In: *Geografisker Annaler* 67B (1985), Nr. 2, S. 83–88
- [5] ARNDT, W.H. ; EINACKER, I. ; FLÄMIG, H. ; SCHNEIDER, C. ; SOMMER, K. ; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Erprobung von Maßnahmen zur umweltschonenden Abwicklung des städtischen Wirtschaftsverkehrs. Forschungsbericht 29796011/2 UBA-FB 000133*. Bonn, 2000
- [6] AVINERI, E.: Nudging Travellers to Make Better Choices. The international Choice Modelling Conference. 30. März - 2. April 2009, Harrogate - Großbritannien, 2009
- [7] BAKER, K. ; K.J., Lomas ; RYLATT, M.: Energy use. In: JENKS, M. (Hrsg.) ; JONES, C. (Hrsg.): *Dimension of the Sustainable City*, 2010
- [8] BALLAS, D. ; CLARKE, G.: Modelling the local impacts of national social policies: A Microsimulation Approach. Paper presented at the 11th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography. September 1999, Durham - England, 1999
- [9] BARREDO, J. ; LAVALLE, C. ; KASANKO, M. ; MCCORMICK, N.: Sustainable urban and regional planning: The MOLAND activities on urban scenario modelling and forecast. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003

- [10] BATTY, M.: *Cities and Complexity - Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models and Fractals*. London : MIT Press, 2005
- [11] BATTY, M. ; LONGLEY, P.: *Fractal City: A geometry of form and function*. London : Academic Press, 1994
- [12] BECKER, G.S.: A theory of the allocation of time. In: *The economic Journal* 75 (1965), Nr. 299, S. 493–517
- [13] BEHRENDTS, S. ; DECKL, S. ; KREBS, T. ; STUCKEMEIER, A. ; STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Ausstattung und Wohnsituation privater Haushalte. Einkommens- und Verbrauchsstichprobe*. 2003
- [14] BEHRENDTS, S. ; KOTT, K. ; STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Zuhause in Deutschland - Ausstattung und Wohnsituation privater Haushalte*. 2009
- [15] BENENSON, I. ; TORRENS, Paul M.: *Geosimulation*. Chichester : John Wiley & Sons,LTD, 2004
- [16] BENGUIGUI, L. ; CZAMANSKI, D. ; MARINOV, M. ; PORTUGALI, Y.: When and where is a city fractal? In: *Environment and Planning B: Planning and Design* 27 (2000), Nr. 4, S. 507–519
- [17] BHAT, C.R. ; PENDYALA, R.M.: Modeling intra-household interactions and group decision-making. In: *Transportation* 32 (2005), Nr. 5, S. 443–448
- [18] BHAT, C.R. ; SRINIVASAN, S. ; AXHAUSEN, K.W.: An analysis of multiple interepisode durations using a unifying multivariate hazard model. In: *Transportation Research Part B* 39 (2005), S. 797–823
- [19] BIESIOT, W. ; NOORMAN, K.L.: Energy requirements of household consumption: a case study of the Netherlands. In: *Ecological Economics* 28 (1999), S. 367–383
- [20] BIN, S. ; DOWLATABADI, H.: Consumer lifestyle approach to US energy use and the related  $CO_2$  emmissions. In: *Energy Policy* 33 (2005), S. 197–208
- [21] BLOCK, A. ; VON BLOH, W. ; SCHNELLNHUBER, H.J.: Efficient box-counting determination of generalized fractal dimension. In: *Physical Review A* 42 (1990), Nr. 4, S. 1869–1874

- [22] BORTZ, J. ; LIENERT, G. ; BOEHNKE, K.: *Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik*. 3. Berlin : Springer, 2008
- [23] BOSSARD, M. ; FERANEC, J. ; OTAHEL, J.: *CORINE land cover technical guide - Addendum 2000*. Copenhagen, 2000
- [24] BOWMAN, J.: Historical development of activity based model theory and practice. In: *Traffic Engineering and Control* 50 (2009), Nr. 2, S. 59–62
- [25] BRAAM, W.: *Stadtplanung*. 3. 1999
- [26] BRADLEY, M. ; J., Bowman: Design Features of Activity-Based Microsimulation Models for U.S. Metropolitan Planning Organizations. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES (Hrsg.): *Conference Proceedings 42: Innovations in Travel Demand Modeling*. Washington D.C., 2006, S. 22–31
- [27] BRADLEY, M. ; VOVSHA, P.: A model for joint choice of daily activity pattern types of household members. In: *Transportation* 32 (2005), Nr. 5, S. 545–571
- [28] BRADTKE, T.: *Statistische Grundlagen für Ökonomen*. 2. Oldenbourg, 2007
- [29] BRÜCHER, W.: *Energiegeographie - Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik*. 2009
- [30] BRETAGNOLLE, A. ; PUMAIN, D. ; VACCHIANI-MARCUZZO, C.: The Organization of Urban Systems. In: LANE, D. (Hrsg.) ; VAN DER LEEUW, S. (Hrsg.) ; PUMAIN, D. (Hrsg.) ; WEST, G. (Hrsg.): *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change*, 2009
- [31] BROWNING, M. ; CHIAPPORI, P.A. ; LECHENE, V.: Collective and unitary models: A clarification. In: *Review of economics of the household* 4 (2006), Nr. 1, S. 5–14
- [32] BÄRWALDT, M. ; KURRAT, M.: Auswirkungen von Haushaltsstromtarifen auf der Basis stochastischer Haushaltslastprofile. X. Symposium Energieinnovation 13.-15. Februar 2008, Graz - Österreich, 2008
- [33] BUEHLER, R.: Determinants of transport mode choice: a comparison of Germany and the USA. In: *Journal of Transport Geography* 19 (2011), S. 644–657
- [34] BULIUNG, R.N. ; KANAROGLU, P.S.: A GIS toolkit for exploring geographies of household activity/travel behaviour. In: *Journal of Transport Geography* 14 (2006), S. 35–51

- [35] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.) ;  
BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (Hrsg.): *Handlungskatalog:  
Optionen erneuerbarer Energien im Stadtraum*. Bonn, 2009
- [36] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.) ;  
BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (Hrsg.): *Nutzung städtischer  
Freiflächen für erneuerbare Energien*. Bonn, 2009
- [37] CHARYPAR, D. ; NAGEL, K.: Genetic complete all-day activity plans with genetic  
algorithms. In: *Transportation* 32 (2005), S. 369–397
- [38] CHEN, C. ; GÄRLING, T. ; KITAMURA, R.: Activity rescheduling: reasoned or  
habitual? In: *Transportation Research Part F* 7 (2004), S. 351–371
- [39] CHIAPPORI, P.A. ; HADDAD, L. ; HODDINOTT, J. ; KANBUR, R.: Unitary versus  
Collective Models of the Household - Time to shift the burdon of proof? Policy  
Research Working Paper 1217 / Worldbank. 1993. – Forschungsbericht
- [40] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES: *Green Paper on the Urban  
Environment*. Brussels, 1990
- [41] DEUTSCHER STÄDTETAG (HRSG.): Demographischer Wandel - Herausforderun-  
gen, Chancen und Handlungsmöglichkeiten für die Städte. Arbeitspapier des deut-  
schen Städtetages., 2006
- [42] DEUTSCHER STÄDTETAG (HRSG.): Klimaschutz in den Städten. Positionspapier.,  
2008
- [43] DOHRN-VAN ROSSUM, G: *Die Geschichte der Stunde - Uhren und moderne Zeit-  
ordnungen*. Köln : Anaconda, 2007
- [44] DRUMM, H.J.: *Personalwirtschaft*. 6. Springer, 2008
- [45] EBERLE, U. ; ÖKO-INSTITUT (Hrsg.): *Herde als EcoTopTen-Produkte*. 2007
- [46] EBERLING, M. ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR URBANISTIK (Hrsg.): *Time Structu-  
res of the city - Case Study Bremen. Occasional Paper*. Berlin : W.Kohlhammer,  
1999
- [47] EHLING, M. ; E., Holz ; KAHLE, I.: Erhebungsdesign der Zeitbudgeterhebung  
2001/2002. In: STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Wirtschaft und Statistik* 6,  
2001

- [48] ELLEGÅRD, K. ; COOPER, M.: Complexity in daily life - a 3D - visualization showing activity patterns in their contexts. In: *electronic International Journal of Time Use Research* 1 (2004), Nr. 1, S. 37–59
- [49] ELLEGÅRD, K. ; PALM, J.: Visualizing energy consumption activities as a tool for making every day life more sustainable. In: *Applied Energy* 88 (2011), S. 1920–1926
- [50] EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): *Sustainable Urban Transport Plans*. 2007
- [51] EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): *EU energy and transport in figures - Statistical Pocketbook*. 2010
- [52] EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (Hrsg.): *Urban Sprawl in Europe - the ignored challenge*. EEA Report 10. 2006
- [53] EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (Hrsg.): *Climate for a transport change - Term 2007: indicators tracking transport and environment in the European Union*. EEA Report 1. 2008
- [54] EVERDING, D. (Hrsg.): *Solarer Städtebau*. Stuttgart : W.Kohlhammer, 2007
- [55] FALLER, A.: *Visualisierungsansätze von Stadtrhythmen*. 2001
- [56] FLUHR, J. ; AHLERT, K.H. ; WEINHARDT, C.: A Stochastic Model for Simulating the Availability of Electric Vehicles for Services to the Power Grid. Paper presented at the 43rd International Conference on System Sciences 2010 Hawaii, 2009
- [57] FONSECA, J.W: Urban-Rank-Size Hierarchy: A Mathematical Interpretation. Ann Arbor: Institute of Mathematical Geography. Monograph#8, 1989
- [58] FRANKHAUSER, P.: Comparing the morphology of urban patterns in Europe - a fractal approach. In: BORSDORF, A. (Hrsg.) ; ZEMBRI, P. (Hrsg.): *European Cities - Structures - Insights on Outskirts*. Brussels, 2004
- [59] FREIDLIN, B. ; GASTWIRTH, J.-L.: Should the median test be retired from general use? In: *The American Statistician* 54 (2000), Nr. 3, S. 161–164
- [60] FÖRSTER, M. ; KLEINSCHMITT, B.: Einfluss von Segmentierungsskalen auf Strukturparameter zur Wissensbasierten Klassifikation am Beispiel von Natura 2000 Lebensraumtypen - Beiträge zum Workshop der IALE-AG Landschaftsstruktur - Berlin 2006. In: KLEINSCHMITT, B. (Hrsg.) ; WALZ, U. (Hrsg.): *Landschaftsstrukturmaße in der Umweltplanung*. Technische Universität Berlin, 2006 (S19)

- [61] FULFORD, C.: The Compact City and the Market: The Case of Residential Development. In: JENKS, M. (Hrsg.) ; BURTON, E. (Hrsg.) ; WILLIAMS, E. (Hrsg.): *The compact city - a sustainable urban form*, E & FN Spon, 1996
- [62] GALSTER, G. ; HANSON, R. ; RATCLIFFE, M.R. ; WOLMAN, H. ; COLEMAN, S. ; FREIHAGE, J.: Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept. In: *Housing Policy Debate* 12 (2001), Nr. 4, S. 681–717
- [63] GILBERT, G. ; DAJANI, J.S.: Energy, urban form and transportation policy. In: *Transportation research* 8 (1974), Nr. 4-5, S. 267–276
- [64] GOLANY, G.: *Ethics & Urban design - Culture, Form & Environment*. New York : John Wiley & Sons, 1995
- [65] GOLLEDGE, R. ; GÄRLING, T.: Spatial Behavior in Transportation Modeling and Planning. In: GOULIAS, K. (Hrsg.): *Transportation Systems Planning Methods and Applications*. CRC Press, 2003
- [66] GRASSMUCK, V. ; BUNDESAMT FÜR POLITISCHE BILDUNG (Hrsg.): *Freie Software Zwischen Privat- und Gemeineigentum. Schriftenreihe Band 458*. 2. Bonn, 2004
- [67] GÄRLING, T. ; KWAN, M.P. ; GOLLEDGE, R.: Computational-process modelling of household activity scheduling. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 28 (1994), Nr. 5, S. 355–364
- [68] GUÉROIS, M. ; PUMAIN, D.: Built-up encroachment and the urban field: a comparison of forty European cities. In: *Environment and Planning A* 40 (2008), S. 2186–2203
- [69] HANNES, E. ; JANNSENS, D. ; WETS, G.: Destination Choice in daily activity travel: the mental map's repertoire. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2054 (2008), S. 20–27
- [70] HANNES, E. ; JANSSENS, D. ; WETS, G.: Does space Matter? Travel Mode Scripts in Daily Activity Travel. In: *Environment and Behaviour* 41 (2009), Nr. 1, S. 75–100
- [71] HARALICK, R.M. ; SHAPIRO, L. G.: *Computer and Robot Vision*. Bd. 1. Addison-Wesley, 1992

- [72] HELBRECHT, I.: Urbane Zeitpolitik - Der Zusammenhalt der Zeiten in der Stadt. In: MÜCKENBERGER, U. (Hrsg.) ; TIMPF, S. (Hrsg.): *Zukünfte der europäischen Stadt - Ergebnisse einer Enquete zur Entwicklung und Gestaltung urbaner Zeiten*, 2007, S. 233–250
- [73] HENCKEL, D. ; GRABOW, B. ; KUNERT-SCHROTH, H. ; NOPPER, E. ; RAUCH, N. ; DEUTSCHES INSTITUT FÜR URBANISTIK (Hrsg.): *Zeitstrukturen und Stadtentwicklung. Schriftenreihe des deutschen Instituts für Urbanistik. Band 81*. Stuttgart : W.Kohlhammer, 1989
- [74] HEROLD, M. ; GOLDSTEIN, N.C. ; K.C., Clarke: The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. In: *Remote Sensing of Environment* 86 (2003), S. 286–302
- [75] HERRMANN, J.: *Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Potential von klein-Blockheizkraftwerken*, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2006
- [76] HÜHNERBEIN, B. ; REESE, C. ; HOFMANN, L.: Stochastisches Lastmodell (TP 4). In: KURRAT, M. (Hrsg.): *Dezentrale Energiesysteme. Tagungsband 2. Statusseminar. Braunschweig*, 2008
- [77] HRADIL, H.: *Soziale Ungleichheit in Deutschland*. 8. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005
- [78] HRADIL, H.: Soziale Milieus- eine praxisorientierte Forschungsperspektive. In: BUNDESAMT FÜR POLITISCHE BILDUNG (Hrsg.): *Soziale Milieus*, 2006
- [79] HUMPERT, K.: *Einführung in den Städtebau*. 1997
- [80] IRELAND, C.T. ; KULLBACK, S.: Contingency tables with given marginals. In: *Biometrika* 55 (1968), Nr. 1, S. 179–188
- [81] JABAREEN, Y.R: Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models and Concepts. In: *Journal of Planning Education and Research* 26 (2006), S. 38–52
- [82] JACOBS, J.: *The death and life of great american cities*. New York : Random House, 1961
- [83] JENKS, M. (Hrsg.) ; BURTON, E. (Hrsg.) ; WILLIAMS, E. (Hrsg.): *The compact city - a sustainable urban form*. 1. London : E & FN Spon, 1996



- [84] JENKS, M. (Hrsg.) ; COLIN, J. (Hrsg.): *Dimensions of the Sustainable City*. 1. Dordrecht : Springer, 2010
- [85] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Berlin : Springer, 2005
- [86] JOH, C.H. ; ARENTZE, T. ; TIMMERMANS, H.: Understanding activity scheduling and rescheduling behaviour: Theory and numerical illustration. In: *GeoJournal* 53 (2001), S. 359–371
- [87] KARATHODOROU, N. ; GRAHAM, D.J. ; NOLAND, R.B.: Estimating the effect of urban density on fuel demand. In: *Energy Economics* 32 (2010), S. 86–92
- [88] KEIRSTEAD, J. ; SAMSATLI, N. ; SHAH, N.: SYNCITY: An integrated tool kit for urban energy systems modelling. Paper presented at the fifth Urban Research Symposium 2009 Marseilles, 2009
- [89] KHANDKER, M.N.H.: *Modelling Activity Generation Processes*, University of Toronto, Diss., 2007
- [90] KHANDKER, M.N.H.: A random utility maximization (RUM) based dynamic activity scheduling model: Application in weekend aktivty scheduling. In: *Transportation* 38 (2011), Nr. 1, S. 123–151
- [91] KÜHNERT, C. ; HELBING, D. ; WEST, G.: Scaling laws in urban supply networks. In: *Physica A* 363 (2006), Nr. 1, S. 96–103
- [92] KOCH, A.: Sozialgeographische agentenbasierte Geosimulation - Zur Komplementarität von Raumsemantik und Raummodell. In: *Klagenfurter Geographische Schriften* Heft 23 (2003), S. 35–64
- [93] KOCH, A.: Agentenbasierte Simulation sozialräumlicher Interaktionsprozesse. Ein systemtheoretischer Ansatz zur Überwindung des Komplementaritätsproblems. In: *Greifswalder geographische Arbeiten* 39 (2006), S. 123–136
- [94] KOIJMA, N. ; LABA, M. ; LIENDO, X. ; BRADLEY, A. ; A., Millington ; BAVEYE, P.: Causes of the apparent scale independence of fractal indices associated with forest fragmentation in Bolivia. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 61 (2006), S. 84–94
- [95] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *Grünbuch - Hin zu einer neuen Kultur der Mobilität in der Stadt*. Brüssel, 2007



- [96] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *Aktionsplan urbane Mobilität*. Brüssel, 2009
- [97] KOSTOF, S.: *The city shaped: urban patterns and meaning through history*. 1. Boston : Little Brown & Co, 1991
- [98] KRAMER, C.: *Zeit für Mobilität*. Stuttgart : Franz Steiner Verlag, 2005
- [99] KRONENBERG, T. ; FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH (Hrsg.): *Auswirkungen des demographischen Wandels auf die Konsumausgaben der privaten Haushalte. STE Research Report*. 2008
- [100] KWAN, M.-P.: GIS Methods in Time-Geographic Research: Geocomputing And Geovisualization of Human Activity Patterns. In: *Geografisker Annaler* 86 (2004), Dezember, S. 267–280
- [101] KWAN, M.-P.: Mobile Communications, Social Networks, and Urban Travel: Hypertext as a new Metaphor for Conceptualizing Spatial Interaction. In: *The Professional Geographer* 59 (2007), Nr. 4, S. 434–446
- [102] LAHTI, P.: Traditional and new models explaining urban and regional form and change - case Helsinki. In: BORSODORF, A. (Hrsg.) ; ZEMBRI, P. (Hrsg.): *European Cities - Structures - Insights on Outskirts*. Brussels, 2004, S. 31–48
- [103] LARIVIÉRE, I. ; LAFRANCE, G.: Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density. In: *Energy Economics* 21 (1999), S. 53–66
- [104] LEVINE, M. ; VORATZ, D. Ürge ; BLOK, K. ; GENG, L. ; HARVEY, D. ; LANG, S. ; LEVERMORE, G.: Residential and commercial buildings. Contribution of the working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: METZ, B. (Hrsg.) ; DAVIDSON, O. (Hrsg.) ; BOSCH, P. (Hrsg.) ; DAVE, R. (Hrsg.) ; MEYER, L. (Hrsg.): *Climate Change 2007: Mitigation*. Cambridge : Cambridge Univrsity Press, 2007
- [105] LIAO, L. ; FOX, D. ; KAUTZ, H.: Extracting Places and Activities from GPS Traces Using Hierarchical Conditional Random Fields. In: *International Journal of Robotics Research* 26 (2007), Nr. 1, S. 119–134
- [106] LOVEJOY, S.: Area-perimeter relation for rain and cloud areas. In: *Science* 216 (1982), S. 185–187

- [107] LYNCH, K.: *A good city form*. 1. 1981
- [108] LYNCH, K.: What Is the Form of a city, and How Is It Made? In: MARZLUFF, E. J.M.and S. J.M.and Shulenberger (Hrsg.) ; ENDLICHER, W. (Hrsg.) ; ALBERTI, M. (Hrsg.) ; BRADLEY, G. (Hrsg.) ; RYAN, C. (Hrsg.) ; SIMON, U. (Hrsg.) ; ZUMBRUNNEN, C. (Hrsg.): *Urban Ecology*, 2008
- [109] MEILING, G. ; QUIZHONG, L.: Realizing the Box-counting Method for Calculating Fractal Dimension of Urban Form Based on Remote Sensing Image. In: *Geo-spatial Information Science* 12 (2009), Nr. 4, S. 265–270
- [110] MEINEL, G. ; SCHUBERT, I. ; SIEDENTOP, S. ; BUCHROITHNER, M.: Europäische Siedlungsstrukturvergleiche auf Basis von Corine land Cover - Möglichkeiten und Grenzen. Paper presented at the REAL CORP 2007 Wien, 2007
- [111] MERZ, J.: *Time Use and Time Budgets - Improvements, Future Challenges and Recommendations*. MPRA Paper No. 16304. 2009
- [112] MILLER, H.-J.: What about People in Geographic Information Science. In: FISHER, P. (Hrsg.) ; UNWIN, D. (Hrsg.): *Re-Presenting GIS*, 2005
- [113] MINALDI, O. ; RAVEH, A. ; SALOMON, I.: Urban density end energy consumption: a new look at old statistics. In: *Transportation Research Part A* 38 (2004), S. 143–162
- [114] MONTERO, R.S. ; BRIBIESCA, E.: State of the Art of Compact and Circularity Measures. In: *International Mathematical Forum* 4 (2009), Nr. 27, S. 1305–1335
- [115] MORRIS, A.E.J.: *History of urban Form - Before the Industrial Revolutions*. 3. 1994
- [116] MUELLER, K. ; AXHAUSEN, K.W.: Population synthesis for microsimulation: State of the art, paper presented at the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., 2011. – Forschungsbericht
- [117] MUNIZ, I. ; GALINDO, A.: Urban form and the ecological footprint of commuting. The Case of Barcelona. In: *Ecological Economics* 55 (2005), S. 499–514
- [118] NEUMANN, M.: The compact city fallacy. In: *Journal of Planning Education and Research* 25 (2005), Nr. 1, S. 11–26

- [119] NEWMAN, P. ; KENWORTHY, J.: *Cities and Automobile Dependence - An international sourcebook*. Aldershot : Gower, 1989
- [120] NÖLTING, B. ; KEPPLER, D. ; GRÜTTNER, F. ; HIRSCHL, B. ; ARETZ, A. ; BÖTHER, T.: Mecklenburg-Vorpommern als Leitregion für wirtschaftliche Entwicklung durch den Ausbau erneuerbarer Energien. Eine Studie im Auftrag der SPD-Landtagsfraktion Mecklenburg-Vorpommern / Innovationsverbund Ostdeutschlandforschung. 2011. – Forschungsbericht
- [121] OLARU, D. ; SMITH, B.: Modelling behavioural rules for daily activity scheduling using fuzzy logic. In: *Transport* 32 (2005), S. 423–441
- [122] OWENS, S.: *Energy, Planning and Urban Form*. London : Pion Limited, 1986
- [123] OWENS, S.: Energy, environmental sustainability and land-use planning. In: BREHENY, M. (Hrsg.): *Sustainable development and urban form*. London : Pion, 1992
- [124] PAATERO, J.V. ; LUND, P.D.: A model for generating household electricity load profiles. In: *International Journal of Energy Research* 30 (2006), S. 273–290
- [125] PETERSOHN, H.: *Data Mining - Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur*. München : Oldenburg Verlag, 2005
- [126] POHL, T.: Zeitgeographische Prozesse in der Stadt und ihre Relevanz für raumstrukturelle Disparitäten. In: *Greifswalder geographische Arbeiten* 39 (2006), S. 137–144
- [127] POUDENX, P. ; MERIDA, W.: Energy demand and greenhouse gas emissions from urban passenger transport versus availability of renewable energy: The example of Canadian Lower Fraser Valley. In: *Energy* 32 (2007), S. 1–9
- [128] PRINZ, D.: *Städtebau. (2.Bd)*. 6. 1997
- [129] PŘIBYL, O.: *A microsimulation model of activity patterns and within household interactions*, The Pennsylvania State University, Diss., 2004
- [130] RAITH, E.: Stadtmorphologie - Annäherungen, Umsetzungen, Aussichten. Habilitationsschrift - Technische Universität Wien, 1998
- [131] RATTI, C. ; BACKER, N. ; STEEMERS, K.: Energy consumption and urban texture. In: *Energy and Buildings* 37 (2005), S. 762–776

- [132] RAYDAN, D. ; STEEMERS, K.: Environmental Urban Design. In: SANTAMOURIS, M. (Hrsg.): *Environmental Design of Urban Buildings - An integrated approach*. London : Earthscan, 2006
- [133] REUSSWIG, F. ; GERLINGER, K. ; EDENHOFER, O. ; GERSTENGARBE, F.-W. (Hrsg.): *Lebensstile und globaler Energieverbrauch - Analyse und Strategieansätze zu einer nachhaltigen Energiestruktur*. Potsdam Institute for climate impact research - Report No.90. Potsdam, 2004
- [134] RICHARDSON, I. ; THOMSON, M. ; INFELD, D.: A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulation. In: *Energy and buildings* 40 (2008), S. 1560–1566
- [135] RICHARDSON, I. ; THOMSON, M. ; INFELD, D. ; CLIFFORD, C.: Domestic electricity use: A high resolution energy demand model. In: *Energy and buildings* 42 (2010), S. 1878–1887
- [136] RINDSFÜSER, G.: Die Verwendung zeitbezogener Daten für die Analyse von Aktivitätensequenzen im Kontext der Verkehrsnachfragemodellierung. In: STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Zeitbudget in Deutschland - Erfahrungsberichte der Wissenschaft*. Wiesbaden, 2001, S. 58–77
- [137] ROORDA, Matthew T. ; HABIB, Miller Eric J. Khandker M. N.: Validation of TASHA: A 24-h activity scheduling microsimulation model. In: *Transportation research Part A* 42 (2008), S. 360–375
- [138] RYGOLE, D.: *Energy and Urban Form - The need for energy conscious urban planning*. Center for Metropolitan Planning and Research. The Johns Hopkins University. Baltimore, 1978
- [139] SACHS, L. ; HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R*. 12. Berlin : Springer, 2007
- [140] SALOMON, I. ; FEITELSON, E. ; COHEN, G. ; MOECKEL, R. ; SPIEKERMANN, K. ; WEGENER, M.: Sustainable Mobility in Cities: Qualitative and Quantitative Analysis. Berichte aus dem Institut für Raumplanung 56 / Universität Dortmund. 2002. – Forschungsbericht

- [141] SANTAMOURIS, M.: Heat Island Research in Europe: The State of the Art. In: SANTAMOURIS, M. (Hrsg.): *Advances in Building Energy Research*. London : Earthscan, 2007, S. 123–150
- [142] SAUNDERS, M.J. ; KUHNIMHOF, T. ; CHLOND, B. ; DA SILVA, A.N.R.: Incorporating transport energy into urban planning. In: *Transport Research Part A* 42 (2008), S. 874–882
- [143] SCHIPPER, L. ; BARTLETT, S. ; HAWK, D. ; VINE, E.: Linking Life-Styles and Energy Use: A matter of time? In: *Annual Review of Energy* 14 (1989), S. 273–320
- [144] SCHLICH, R.: *Verhaltenshomogene Gruppen in Längsschnitterhebungen*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Diss., 2004
- [145] SCHÜSSLER, F.: Historical review of energy topics in German geographical literature from 1950 to 2008. In: *Erdkunde* 3 (2009), S. 269–282
- [146] SCHWARZ, N.: Urban form revisited - Selecting indicators for characterising European cities. In: *Landscape and Urban Planning* 96 (2010), S. 29–47
- [147] SCHWEPPE-KRAFT, B.: *Entwicklung eines Indikators zur Messung der Zersiedlung von Landschaft*. Vortrag, Workshop: Stand und Entwicklung der Flächenversiegelung, TLUG, Jena, 2009
- [148] SHAW, S.-L. ; YU, H.: A GIS-based time-geographic approach of studying individual activities in a hybrid physical-virtual space. In: *Journal of transport Geography* 17 (2009), S. 141–149
- [149] SHAW, S.-L. ; YU, H. ; BOMBOM, L.S.: A Space-Time GIS Approach to Exploring Large Individual-based Spatiotemporal Datasets. In: *Transactions in GIS* 12 (2008), Nr. 4, S. 425–441
- [150] SNYDER, J.-P. ; U.S. GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.): *Map Projections - A working manual*. United States Government printing office, 1987
- [151] SONG, C. ; QU, Z. ; BLUMM, N. ; BARABÁSI, A.L.: Limits of predictability in human mobility. In: *Science* 327 (2010), S. 1018–1021
- [152] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Alltag in Deutschland : Analysen zur Zeitverwendung - Beiträge zur Ergebniskonferenz der Zeitbudgeterhebung 2001/02 am 16./17. Februar 2004 in Wiesbaden*. 2004

- [153] STATISTISCHES BUNDESAMT ; STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Wirtschaftsrechnungen - Einkommens- und Verbrauchsstichprobe - Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern. Fachserie 15 Heft 1*. 2008
- [154] STEEMERS, K.: Energy and the city: density, buildings and transport. In: *Energy and buildings* 35 (2003), S. 3–14
- [155] ÖSTEREICHISCHE RAUMORDNUNGSKONFERENZ (Hrsg.): *Energie und Raumentwicklung - Räumliche Potentiale Erneuerbarer Energieträger. Schriftenreihe Nr. 178*. Wien, 2009
- [156] SULLIVAN, L.H.: The tall office building artistically considered. In: *Lippincott's monthly magazine* (1896), S. 403–409
- [157] TALEN, E. ; ELLIS, C.: Beyond Relativism - Reclaiming the Search for Good City Form. In: *Journal of Planning Education and Research* 22 (2002), S. 36–49
- [158] TANIMOTO, J. ; HAGISHIMA, A. ; SAGARA, H.: Validation of probabilistic methodology for generating actual inhabitants behavior schedules for accurate prediction of maximum energy requirements. In: *Energy and Buildings* 40 (2008), S. 316–322
- [159] TERECI, A. ; KESTEN, D. ; EICKER, U.: The Impact of the urban form on heating, cooling and lightning demand of cities, paper presented at the 1st International Conference on Sustainable Urbanization (ICSU), Hong Kong, China, 15-17 December. 2010. – Forschungsbericht
- [160] THE WORLD BANK (Hrsg.): *Cities and climate change: an urgent agenda*. Washington DC, 2010
- [161] TIMMERMAN, H. (Hrsg.): *Progress in Activity-Based Analyses*. Amsterdam : Elsevier, 2005
- [162] TIMMERMAN, H. ; ZHANG, Junyi: Modeling household activity travel behavior: Examples of state of the art modeling approaches and research agenda. In: *Transport Research Part B* 43 (2009), S. 187–190
- [163] TSAI, Y.H.: Quantifying Urban Form: Compactness versus Sprawl. In: *Urban Studies* 42 (2005), Nr. 1, S. 141–161
- [164] TUROK, I. ; MYKHENKO, V.: The trajectories of european cities, 1960-2005. In: *Cities* 24 (2007), Nr. 3, S. 165–182

- [165] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME: *CCCC Kick the Habit - A UN Guide to Climate Neutrality*. Brüssel, 2008
- [166] VON ROON, S. ; GOBMAIER, T. ; HUCK, M.: Demand Side Management in Haushalten - Methoden zur Potentialanalyse und Kostenabschätzung. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. München, 2010. – Forschungsbericht
- [167] VOVSHA, P. ; BRADLEY, M. ; BOWMAN, J.L.: Activity-based travel forecasting models in the United States: Progress since 1995 and Prospects for the Future. Paper presented at EIRASS Conference 2004 Maastricht, 2004
- [168] VRINGER, K. ; AALBERS, T. ; BLOK, K.: Household energy requirement and value pattern. In: *Energy Policy* 35 (2007), S. 553–566
- [169] VROTSOU, K. ; JOHANSSON, J. ; COOPER, M.: ActiviTree: Interactive Visual Exploration of Sequences in Event-Based Data Using Graph Similarity. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15 (2009), Nr. 6, S. 945–952
- [170] WANG, D. ; LI, J.: A model of household time allocation taking into consideration of hiring domestic helpers. In: *Transport Research Part B* 43 (2009), S. 204–216
- [171] WEBER, C. ; PERRELS, A.: Modelling lifestyle effects on energy demand and related emissions. In: *Energy Policy* 28 (2000), S. 549–566
- [172] WEGENER, M.: *Die Stadt der kurzen Wege*. Dortmund, 1999
- [173] WEGENER, M.: Energy scarcity and climate change: the challenge for urban models, paper presented at the 11th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, University of Hong Kong, 16-18 June. 2009. – Forschungsbericht
- [174] WIDÉN, J. ; ELLEGÅRD, K. ; WÄCKELGÅRD, E.: Markov-chain modelling of high-resolution activity patterns and household electricity demand. Proceedings of the Scientific Conference on Energy Systems and IT, Älvsjö, Sweden, March 11-12, 2009. 2009. – Forschungsbericht
- [175] WIDÉN, J. ; NILSON, A.M. ; WÄCKELGÅRD, E.: A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand. In: *Energy and Buildings* 41 (2009), S. 1001–1012



- [176] WIDÉN, J. ; WÄCKELGÅRD, E.: A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand. In: *Applied Energy* 87 87 (2010), S. 1880–1892
- [177] WILLIS, H.L.: *Spatial Electric Load Forecasting*. 2. New York : Marcel Dekker Inc, 2002
- [178] WIPPERMANN, C. ; FLAIG, B. ; CALMBACH, M. ; KLEINHÜCKELKOTTEN, S. ; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Umweltbewusstsein und Umweltverhalten der sozialen Milieus in Deutschland*. Dessau, 2009
- [179] WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): *Städtebauliche Klimafibel*. Stuttgart, 2008
- [180] WITTMANN, T.: *Agent-Based Models of Energy Investment Decisions*. Heidelberg : Physica-Verlag, 2008
- [181] WURM, M. ; TAUBENBÖCK, H.: Fernerkundung als Grundlage zur Identifikation von Stadtstrukturtypen. In: TAUBENBÖCK, H. (Hrsg.) ; DECH, S. (Hrsg.): *Fernerkundung im urbanen Raum - Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis*, WBG, 2010, S. 94–103
- [182] XU, J. ; AI, N. ; MEI, A. ; LIAO, H.: Quantitative Analysis and fractal modeling on the mosaic structure of landscape in the central area of Shangai metropolis. In: *Chinese geographical science* 13 (2003), Nr. 3, S. 199–206
- [183] YE, X. ; KONDURI, K. ; PENDYALA, R.M. ; SANA, B. ; WADDELL, P.: A methodology to match distributions of both household and person attributes in the generation of synthetic populations. Paper presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2003



# Danksagung

Da zum Gelingen dieser Arbeit nicht nur der Autor beigetragen hat, möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines Dissertationsvorhabens begleitet und motiviert haben. Insbesondere den folgenden Beteiligten gebührt ein besonderer Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

- Herrn Prof. Dr. Peyke für die Übernahme des Erstgutachtens und die fachliche Betreuung dieser Arbeit.
- Herrn Prof. Dr. Hamacher für die Übernahme des Zweitgutachtens als auch für die vielen anregenden Diskussionen, die wir während der letzten drei Jahre führten.
- Der Arbeitsgruppe für Energie- und Systemstudien am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik für die gute Arbeitsatmosphäre.
- Dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik mit seinen Verantwortlichen. Dieser Dank liegt darin begründet, dass dieses Thema jenseits des eigentlichen Forschungsauftrages des Institutes liegt und es daher nicht selbstverständlich ist, dass eine solche Arbeit Unterstützung findet.
- Den beteiligten Partnern des FP7 Projektes *Pathways for Carbon Transition*. Einerseits für die Einblicke in das interessante Themengebiet, als auch andererseits für die Erfahrungen, die ich in dem international ausgerichteten Projekt sammeln konnte. In diesem Zusammenhang sei insbesondere dem Projektleiter Bertrand Château gedankt.
- Herrn Martin Bartelt und Herrn Tobias Eder, meinen Bürokollegen am IPP, für die guten fachlichen Gespräche.
- Zu guter Letzt gilt mein Dank meiner Frau Kathleen Braun, da sie sich entschloss die Küste Pommerns zu verlassen und mit mir nach Bayern zu ziehen, um mich bei diesem Projekt zu begleiten.





